

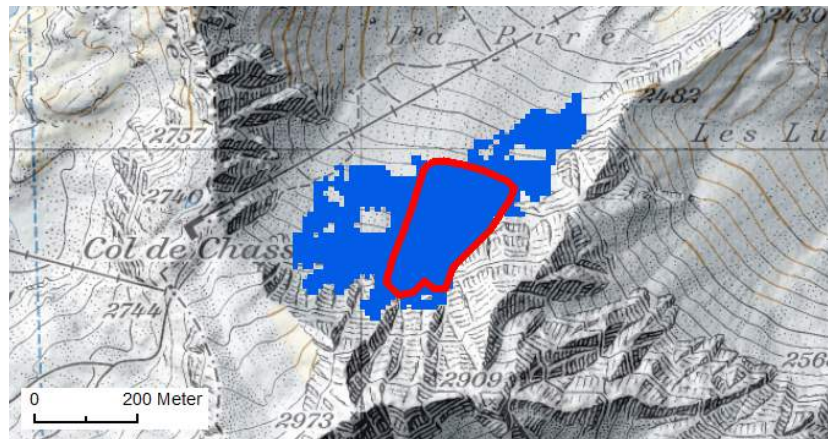
# Extraktion von Hängen rund um Anrisszonen

Eine Methode angewendet auf Unfalllawinen

---



```
ncols      4000
nrows      4000
xllcorner  2563067.1880349
yllcorner  1078949.2909383
cellsize   10
NODATA_value -9999
1280.774 1277.653 1287.586 1282.513 1282.
1300.305 1288.328 1308.687 1308.953 1292.
1316.895 1327.2 1306.628 1324.512 1303.27
1285.935 1284.409 1285.803 1279.995 1287.
1221.071 1211.06 1205.428 1212.423 1188.7
1136.880 1128.34 1121.951 1111.731 1102.7
```



Masterarbeit GEO 511  
Geographisches Institut der Universität Zürich  
Abteilung Geocomputation

Regula Pfister  
10-727-485

Betreuung:  
Prof. Dr. Ross Purves  
Stephan Harvey (SLF)

Fakultätsvertretung:  
Prof. Dr. Ross Purves

Eingereicht am 29. Januar 2016

**Kontakt:**

Regula Pfister  
regula-pfister@gmx.ch

Dr. Prof. Ross Purves  
Geographisches Institut  
Universität Zürich  
Winterthurerstrasse 190  
CH-8057 Zürich  
ross.purves@geo.uzh.ch

Stephan Harvey  
WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung SLF  
Flüelastrasse 11  
7260 Davos Dorf  
harvey@slf.ch

**Bildquellen:****Oben links:**

SLF (2010). Der Neuschnee glitt auf der stark umgewandelten Altschneedecke ab. Hier wurden sogar Skispuren wieder sichtbar. Parsennggebiet, Davos, GR (Foto: J. Rocco 08.02.2010).

**Unten:** Verwendete Daten: Pixelkarte 1:25'000 und swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

## Vorwort

Meine Faszination für das Fach Geographie ist unter anderem auf die Prozesse der Natur zurückzuführen, welchen der Mensch ausgeliefert ist. Ein Beispiel stellt dabei die Lawine dar, welche im Alpenland Schweiz als naheliegendes Forschungsobjekt dient. Während meinem Studium wurde mein Interesse für den Bereich der Geographischen Informationswissenschaft geweckt, deshalb bot sich eine Arbeit an der Schnittstelle GIS und Lawinen an.

Während meiner Arbeit haben mich viele Personen unterstützt, denen ich hier danken möchte:

- Meinen Betreuern Prof. Dr. Ross Purves und Stephan Harvey, welche mich während dem ganzen Arbeitsprozess mit Ratschlägen, Gesprächen und konstruktiver Kritik unterstützt haben.
- Meinen Mits Studenten und Mitstudentinnen für den regen Gedankenaustausch sowie willkommene Ablenkung in Form von Kaffeepausen oder Mittagessen.
- Meinem Bruder Matthias für die grossartige Hilfestellung im Bereich Python.
- Meiner gesamten Familie für angeregte Gespräche, moralische Unterstützung sowie Rückhalt während des gesamten Studiums.
- Meiner Mutter für die Durchsicht dieser Arbeit.
- Meinen Freunden, Freundinnen und Mitbewohnern, welche auf „nach der Arbeit“ vertröstet werden mussten.

## Zusammenfassung

Lawinengefahr bedeutet Lebensgefahr. Jedes Jahr sterben in den Alpen Menschen aufgrund von Lawinen. Die grösste Gefahr stellt dabei die Schneebrettlawine dar. Diese löst sich brettartig und ein Entkommen aus der Lawine ist meist unmöglich, oft sind diese Schneebrettlawinen sogar selbst verschuldet. Obwohl schon vieles über die Prozesse der Lawinen bekannt ist, wurden sogenannte Unfalllawinen noch nicht ausreichend untersucht.

Der Hang rund um eine Anrisszone weist oft ähnliche Geländeparameter auf wie die Anrisszone selbst. Deshalb stellt sich die Frage, weshalb er beim Abgang einer Lawine nicht auch als Anrissgebiet einbezogen wird. Dieser Frage wurde in dieser Arbeit nachgegangen. Es wurde untersucht, inwiefern diese Frage alleine aufgrund der Geländeparameter beantwortet werden kann.

In einem ersten Schritt wurden mit Hilfe von Daten des SLF Anrisszonen von Unfalllawinen digitalisiert, welche für die Untersuchungen in dieser Arbeit als Basis dienten. Anschliessend wurde eine mögliche Definition eines Hanges rund um eine Anrisszone entwickelt und in einem Region-Growing-Ansatz angewendet. Mit dieser Methode konnten Hänge rund um Anrisszonen – mit ähnlichen Geländeparametern wie die dazugehörigen Anrisszonen – automatisch extrahiert werden. Anschliessend wurden die erhaltenen Resultate der Hänge mittels deskriptiver Statistik in den Parametern Länge und Breite, Grösse, Neigung, Exposition, Krümmung und Rauigkeit mit den Anrisszonen verglichen. Aufgrund der gewählten Schwellenwerte unterscheiden sich diese Werte allerdings nicht wesentlich. Auffällig ist aber, dass die Werte der Hänge innerhalb des erlaubten Rahmens ihre Spannweite deutlich ausgedehnt haben.

Ein weiterer Schritt stellte die Evaluation der erhaltenen Hänge dar. Es konnte gezeigt werden, dass diese in den meisten Fällen den Bedingungen genügen, sich nicht über Kämme oder über Täler fortzusetzen. Ausserdem wurde der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Hangausbreitung untersucht: Die Begrenzung der Exposition zeigte am meisten Wirkung auf das Resultat der Hänge. Eine weitere Methode zur Evaluation der Hänge stellte die Compactness dar, welche die Form von Objekten bewertet. Als Resultat konnte festgehalten werden, dass Hänge grundsätzlich weniger kompakt als deren Anrisszonen sind, da erstere Einbuchtungen und Löcher aufweisen können. Ausserdem wurde ein negativer Zusammenhang zwischen der Grösse des Hanges und seiner Kompaktheit ermittelt.

In einem letzten Schritt wurden die generierten Hänge mit Werten aus der Schadenlawinendatenbank des Instituts für Schnee- und Lawinenforschung SLF auf mögliche Zusammenhänge untersucht. In dieser Arbeit liessen sich allerdings kaum relevante Zusammenhänge finden.

Die Resultate dieser Arbeit zeigen, dass alleine aufgrund der Geländeparameter nicht erkannt werden kann, warum Anrisszonen sich inmitten eines Hanges lösen und den Hang rundherum mit ähnlichen Geländeparametern nicht einbeziehen. Es müssten wohl weitere Faktoren, welche saisonale Unterschiede mit sich bringen, wie der Wind oder die Schneedecke, berücksichtigt werden. Dennoch liefert diese Arbeit eine gute Basis für weitere Forschung auf diesem Gebiet.

## Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	<b>i</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abbildungen</b> .....	<b>vi</b>
<b>Tabellen</b> .....	<b>ix</b>
<b>Formeln</b> .....	<b>ix</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>x</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1. <b>Problemstellung und Motivation</b> .....	<b>1</b>
1.2. <b>Zielsetzung</b> .....	<b>2</b>
1.3. <b>Aufbau der Arbeit</b> .....	<b>2</b>
<b>2 Grundlagen</b> .....	<b>3</b>
2.1 <b>Lawinen</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 <b>Schnee</b> .....	<b>3</b>
2.1.2 <b>Lawinenbildende Faktoren</b> .....	<b>4</b>
2.1.3 <b>Typische Lawinensituationen – Lawinenklassifikation</b> .....	<b>6</b>
2.1.4 <b>Einfluss der Schneedecke und der Geländeparameter</b> .....	<b>9</b>
2.2 <b>Geomorphometrie</b> .....	<b>11</b>
2.2.1 <b>Digitale Höhenmodelle</b> .....	<b>12</b>
2.3 <b>Pixel- versus Objektbasierter Ansatz</b> .....	<b>16</b>
2.3.1 <b>Region-Growing</b> .....	<b>18</b>
2.4 <b>Forschungslücken</b> .....	<b>20</b>
<b>3 Daten, Untersuchungsgebiet und Software</b> .....	<b>21</b>
3.1 <b>Datengrundlagen</b> .....	<b>21</b>
3.2 <b>Untersuchungsgebiet</b> .....	<b>23</b>
3.3 <b>Software</b> .....	<b>25</b>
<b>4 Methodik</b> .....	<b>26</b>
4.1 <b>Digitalisieren der Anrisszonen</b> .....	<b>26</b>
4.1.1 <b>Vorgehensweise</b> .....	<b>26</b>
4.1.2 <b>Probleme</b> .....	<b>27</b>
4.2 <b>Hangerkennung von Hand</b> .....	<b>28</b>

<b>4.3</b>	<b>Wahl und Vorbereitung der Daten für den Region-Growing-Algorithmus .....</b>	<b>29</b>
4.3.1	Mögliche Parameter für den Region-Growing-Algorithmus .....	29
4.3.2	Auswahl der Parameter für den Region-Growing-Ansatz .....	32
4.3.3	Schwellenwertsetzung der gewählten Parameter .....	33
<b>4.4</b>	<b>Region-Growing-Algorithmus .....</b>	<b>46</b>
4.4.1	Beschreibung des Codes .....	46
<b>4.5</b>	<b>Deskriptive Statistik von Anrisszonen und Hängen .....</b>	<b>51</b>
4.5.1	Länge und Breite .....	51
4.5.2	Grösse .....	51
4.5.3	Neigung .....	51
4.5.4	Exposition .....	51
4.5.5	Kurvatur .....	52
4.5.6	Rauigkeit .....	54
<b>4.6</b>	<b>Evaluation der erhaltenen Hänge .....</b>	<b>55</b>
4.6.1	Einfluss der Parameter .....	55
4.6.2	Compactness .....	55
4.6.3	Subjektive Beurteilung .....	57
<b>4.7</b>	<b>Zusammenhänge mit Werten aus der SLDB .....</b>	<b>58</b>
4.7.1	Anrissmächtigkeit .....	58
4.7.2	Gefahrenstufen .....	59
4.7.3	Auslöseart .....	59
4.7.4	Multiple Regression .....	59
<b>5</b>	<b>Resultate .....</b>	<b>61</b>
<b>5.1</b>	<b>Eigenschaften von Anrisszonen und ihren Hängen .....</b>	<b>61</b>
5.1.1	Länge und Breite .....	61
5.1.2	Grösse .....	66
5.1.3	Neigung .....	68
5.1.4	Exposition .....	70
5.1.5	Kurvatur .....	75
5.1.6	Rauigkeit .....	78
<b>5.2</b>	<b>Evaluation der erhaltenen Hänge .....</b>	<b>80</b>
5.2.1	Einfluss der Parameter .....	80
5.2.2	Compactness .....	82
5.2.3	Subjektive Beurteilung .....	86

---

<b>5.3</b>	<b>Zusammenhänge mit Werten aus der SLDB .....</b>	<b>87</b>
5.3.1	Mittelwerte der Anrissmächtigkeit.....	87
5.3.2	Maximalwerte der Anrissmächtigkeit.....	89
5.3.3	Zusammenfassung Korrelationsanalyse mit der Anrissmächtigkeit.....	90
5.3.4	Gefahrenstufe .....	91
5.3.5	Auslöseart.....	92
5.3.6	Multiple Regression .....	93
<b>6</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>94</b>
6.1	Eigenschaften von Anrisszonen und Hängen.....	94
6.2	Evaluation der Hänge.....	100
6.3	Frage 1: Extraktion von Hängen rund um Anrisszonen.....	101
6.4	Frage 2: Möglichkeiten und Schwierigkeiten der Hang-Extraktion .....	103
6.5	Frage 3: Zusammenhänge der generierten Daten und der SLDB .....	104
6.6	Forschungsfrage: Hänge rund um Anrisszonen .....	105
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>106</b>
7.1	Arbeitsprozess.....	106
7.2	Erkenntnisse.....	106
7.3	Ausblick .....	107
	<b>Literatur.....</b>	<b>108</b>

## Abbildungen

2.1: Lawinengefahrenstufen (Harvey, Schweizer, et al., 2012) und deren prozentuales Vorkommen (WhiteRisk, o.J.-a).....	4
2.2: Lawinenbulletin für den 10. Januar 2016 (SLF, 2016) .....	5
2.3: Lawinenbulletin, genauere Beschreibung für Grossregionen (SLF, 2016).....	5
2.4: Bereiche einer Schneebrettlawine (WhiteRisk, o.J.-b).....	7
2.5: Von der Bruchinitiierung zur Bruchfortpflanzung (WhiteRisk, o.J.-c) .....	8
2.6: Ursprünge und Teilbereiche der Geomorphometrie (Pike et al., 2009) .....	11
2.7: Entstehung und Weiterverwendung des DHMs in der Geomorphometrie (Pike et al., 2009) ....	12
2.8: Die drei üblichen Strukturierungsmethoden für DHM. A: Gitter-/Rasterstruktur; B: TIN; C: Strukturierung nach Höhen- und Neigungslinien (Pike, 2005) .....	14
2.9: Einfluss der Zellengrösse p auf die Topographie (Hengl & Evans, 2009).....	15
2.10: Ausgangsbild (links), Segmentierung durch punktbasierte Methode (Mitte) als auch durch kantenbasierte Methode (rechts) (Schiewe, 2002) .....	16
2.11: Objektorientierter Ansatz (van Asselen & Seijmonsbergen, 2006) .....	17
2.12: Flussnetzwerk (links) und nach Tälern unterteiltes Flussnetzwerk (rechts) (Straumann, 2010)	19
2.13: Flussdiagramm des Region-Growing-Algorithmus (Schmid, 2014) .....	19
3.1: Untersuchte Lawinen auf dem SWISSIMAGE (oben) und auf die Kantone verteilt inklusive Zoneneinteilung.....	23
3.2: Schadenlawinen nach Auslöseart und Winter (N = 172) .....	24
4.1: Digitalisieren der Anrisszonen (Vontobel, 2011).....	26
4.2: Differenz zwischen höchstem Punkt des digitalisierten Umrisses und höchstem Punkt laut SLD .....	27
4.3: Digitalisierungsfehler (links) und verbesserte Version (rechts).....	27
4.4: Beispiele zur Digitalisierung von Hand .....	28
4.5: Reihenfolge der Vorbereitung für den Region-Growing-Algorithmus.....	29
4.6: Vorgehen Rauigkeitsberechnung nach Cavalli & Marchi (2008).....	30
4.7: Verortung der Testlawinen.....	32
4.8: Krümmung in Anrisszone .....	33
4.9: Neigungskarte, eingeteilt in zwei Klassen .....	34
4.10: Minimum und Maximum der Exposition bei Anrisszonen (eigene Grafik) .....	35
4.11: Berechnete Expositionsänderung von Pixel zu Pixel .....	35
4.12: Anrisszone mit höchster Expositionsänderung .....	36
4.13: Ermittelte Hänge für Schwellenwert 25° .....	36
4.14: Ermittelter Hang bei Expositionsänderung < 5° bis zu < 10° .....	37
4.15: Schwellenwert Expositionsänderung < 5° bis < 8° (links), < 5° bis < 7° (rechts) .....	37
4.16: Schwellenwert Expositionsänderung < 5° bis < 6° .....	38



4.17: Vorhandene Spannweiten der Rauigkeit bei Anrisszonen im Testgebiet .....	39
4.18: Schwellenwert für Rauigkeitswerte (Mitte) im Vergleich zur Pixelkarte und zum DOM.....	39
4.19: Vergleich Rauigkeit 2 m-Auflösung (links) und 10 m-Auflösung (rechts) .....	40
4.20: Ermittelte Hänge beim erlaubten Neigungsverhältnis $> 0.985$ .....	40
4.21: Schwellenwertsetzung Neigungsverhältnis .....	41
4.22: Kaum erkennbare Unterschiede zwischen verschiedenen Ergebnissen der Schwellenwerte .....	41
4.23: Schwellenwert Neigungsverhältnis $> 0.66$ .....	42
4.24: Unterschiedliche Breiten von Anrisszonen .....	43
4.25: Differenz zwischen Spannweite der Anrisszonen und möglicher Spannweite der Exposition je nach Schwellenwertsetzung .....	44
4.26: Beispiele für Anhängsel durch erlaubte Spannbreite der Standardabweichung $\cdot 3$ .....	45
4.27: Aufbau einer ASCII-Datei, hier das DOM für die Rauigkeitsberechnung der Zone 1 .....	46
4.28: Flussdiagramm Region-Growing (Struktur übernommen von Schmid (2014)) .....	47
4.29: Anzahl Nachbarn .....	48
4.30: Nachbarschaft im Region-Growing-Algorithmus .....	48
4.31: Generierung <i>gradient_change</i> und <i>aspect_change</i> .....	49
4.32: Generierung der erlaubten Spannbreite der Expositionswerte .....	49
4.33: Entscheidendes If-Statement .....	50
4.34: Methode MBG (Minimum Bounding Geometry) .....	51
4.35: Plankurvatur vs. Profilkurvatur (Harrison et al., 2008).....	52
4.36: Die neun Geländeformen nach Dikau (1989), Grafik nach Vontobel (2011).....	52
4.37: Kurvatur für Auflösungen von 2 m, 5 m, 10 m, 25 m.....	53
4.38: Häufigkeitsverteilung der Kurvatur je nach Schwellenwert und Auflösung nach Vontobel (2011) .....	54
4.39: Subjektive Beurteilung der Hänge: Beispiele für gut, mittel und schlecht (v.l.n.r.) .....	57
4.40: Transformationen nach Tukey (Stahel, 2013).....	60
5.1: Boxplot zur Länge und Breite von Anrisszonen .....	62
5.2: Länge vs. Breite der Anrisszonen.....	62
5.3: Breite der Anrisszonen der SLDB vs. ermittelte Breite .....	63
5.4: Verteilung der Differenz (Betrag) der unterschiedlichen Anrissbreiten .....	63
5.5: Boxplot zur Breite und Länge von Hängen.....	64
5.6: Länge des Hanges vs. Breite des Hanges .....	64
5.7: Vergleich Breite und Länge der Anrisszonen mit jenen der Hänge.....	65
5.8: Boxplot zur Grösse von Anrisszonen.....	66
5.9: Boxplot zur Grösse von Hängen .....	66
5.10: Grösse der Anrisszone vs. Grösse des Hanges.....	67
5.11: Werteverteilung der Grösse bei Anrisszonen und Hängen .....	67

5.12: Boxplots zur Neigung (AN = Anrisszone; HA = Hang) .....	69
5.13: Neigungsspannweite der Anrisszone vs. jene der Hänge.....	69
5.14: Windrose der Expositionsklassen und deren Wertebereiche .....	70
5.15: Zuteilung der Anrisszonen zu Expositionsklassen .....	70
5.16: Saisonale Exposition bei Anrisszonen .....	71
5.17: Ermittelte Exposition vs. Exposition aus SLDB .....	72
5.18: Zuteilung der Hänge zu Expositionsklassen .....	72
5.19: Exposition bei Anrisszonen vs. Exposition bei Hängen.....	73
5.20: Expositionsspannweite bei Anrisszonen vs. dieselbe bei Hängen .....	73
5.21: Mögliche Expositionsspannweite bei Hängen vs. tatsächliche .....	75
5.22: Krümmung bei Anrisszonen.....	76
5.23: Krümmung bei Vontobel (2011) .....	76
5.24: Krümmung bei Hängen .....	77
5.25: Krümmung bei Anrisszonen vs. Krümmung bei Hängen .....	77
5.26: Rauigkeitsverteilung bei Anrisszonen.....	78
5.27: Rauigkeitsverteilung bei Hängen .....	78
5.28: Einfluss (nicht) verwendeter Parameter .....	81
5.29: Länge vs. runde Anrisszone .....	83
5.30: Compactness bei Hängen .....	83
5.31: Grösse des Hanges vs. Compactness des Hanges .....	84
5.32: Compactness der Anrisszone vs. Compactness des Hanges .....	84
5.33: Grösse der Anrisszone vs. Compactness der Anrisszone.....	85
5.34: Subjektive Beurteilung verglichen mit der Compactness .....	86
5.35: Mittel der Anrissmächtigkeit vs. Anrissbreite und vs. Verhältnis der Breiten.....	87
5.36: Mittel der Anrissmächtigkeit vs. Anrissgrösse und vs. Verhältnis der Grössen .....	88
5.37: Maximum der Anrissmächtigkeit vs. Anrissbreite und vs. Verhältnis der Breiten.....	89
5.38: Maximum der Anrissmächtigkeit vs. Anrissgrösse und vs. Verhältnis der Grössen .....	90
5.39: Gefahrenstufe vs. Anrissbreite und vs. Verhältnis der Breiten .....	91
5.40: Gefahrenstufe vs. Anrissgrösse und vs. Verhältnis der Grössen.....	91
5.41: Auslöseart vs. Anrissbreite und vs. Verhältnis der Breiten.....	92
5.42: Auslöseart vs. Anrissgrösse und vs. Verhältnis der Grössen .....	92
6.1: Überwindung der Reibung bei Schneebrettern (links); Hangneigung bei typischen Unfall- lawinen (rechts) (WhiteRisk, o.J.-d) .....	96
6.2: Beispiel einer Neigungsabnahme in der Anrisszone .....	96
6.3: Ungenau digitalisierte Anrisszone.....	97

## Tabellen

3.1:	Infos zu den Zonen des Untersuchungsgebiets.....	24
4.1:	Mögliche Parameter für die Hang-Extraktion .....	29
4.2:	Verteilung der Anrisszonen nach ihrer absoluten Höhe .....	31
4.3:	Compactness-Werte für verschiedene Geometrien.....	56
4.4:	Anzahl Anrisszonen bezüglich Gefahrenstufen laut SLDB .....	59
5.1:	Korrelationsanalyse Anrissbreite - Anrisslänge .....	62
5.2:	Korrelationsanalyse Anrissbreite – Hangbreite / Anrisslänge - Hanglänge .....	65
5.3:	Korrelationsanalyse Anrissgrösse - Hanggrösse.....	67
5.4:	Einteilung der Expositionswerte in 16 Klassen .....	71
5.5:	Kombinationen der Spannweiten bei der Exposition (AN = Anriss, HA = Hang).....	74
5.6:	Verteilung der vorkommenden Kombinationen (AN = Anriss, HA = Hang) .....	75
5.7:	Verwendete Parameter inklusive Schwellenwerte.....	80
5.8:	Einfluss (nicht) verwendeter Parameter in Zahlen .....	82
5.9:	Korrelationsanalyse Hanggrösse - Compactness Hang .....	84
5.10:	Korrelationsanalyse Compactness der Anrisszone - Compactness des Hanges .....	85
5.11:	Korrelationsanalyse Anrissgrösse - Compactness der Anrisszon.....	85
5.12:	Korrelationsanalyse Anrissbreite/Verhältnis der Breiten – Mittelwerte Anrissmächtigkeit ...	88
5.13:	Korrelationsanalyse Anrissgrösse/Verhältnis der Grössen – Mittelwerte Anrissmächtigkeit..	88
5.14:	Korrelationsanalyse Anrissbreite/Verhältnis der Breiten – Maximalwerte Anrissmächtigkeit	89
5.15:	Korrelationsanalyse Anrissgrösse/Verhältnis der Grösse – Maximalwerte Anrissmächtigkeit	90
5.16:	Zusammenfassung Korrelationsanalyse Anrissmächtigkeit .....	90

## Formeln

4.1:	Berechnung der Rauigkeit (Cavalli & Marchi, 2008).....	31
4.2:	Berechnung der Compactness (Bogaert et al., 2000).....	55
4.3:	Abgeänderte Berechnung der Compactness (Bogaert et al., 2000) .....	56

## Abkürzungen

ASCII = American Standard Code for Information Interchange

DEM = Digital Elevation Model, deutsch: DHM

DGM = Digitales Geländemodell

DHM = Digitales Höhenmodell/Digitale Höhenmodelle

DOM = Digitales Oberflächenmodell

DTM = Digital Terrain Model, deutsch: DGM

LiDAR = Light detection and ranging

MBG = Minimum Bounding Geometry

OBIA = Object Based Image Analysis (deutsch: Objekt-basierte Bild-Analyse)

PK = Pixelkarte

SLDB = Schadenlawinendatenbank vom SLF

SLF = WSL-Institut für Schnee- und Lawinenforschung

TIN = Triangular Irregular Network

WSL = Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft

# 1 Einleitung

## 1.1. Problemstellung und Motivation

Auf viele Menschen übt die verschneite Alpenwelt eine grosse Anziehungskraft aus. Doch gleichzeitig bergen diese wunderschönen Landschaften auch Gefahren: Jeden Winter vernehmen wir durch die Medien unzählige Meldungen von Wintersportlern, welche von Lawinen verschüttet wurden. Dabei wird der grösste Teil der abgehenden Lawinen vom Menschen selber ausgelöst. Nach Schweizer & Lütchg (2001) machen Lawinen ausgelöst durch Freizeitsportler etwa 90% aller Lawinen-Unglücksfälle aus. Es wird bei Freizeitsportlern unterschieden, ob sich jene auf einer Tour befinden oder ob sie auf nicht gekennzeichneten Hängen von Skigebieten aus fahren, „Off-pist“ genannt. Damit eine Lawine überhaupt freigesetzt wird (durch den Menschen oder natürlich) müssen bestimmte Bedingungen herrschen. Sowohl die Geländeparameter (Neigung, Exposition, Geländeform, Höhenlage) spielen eine Rolle als auch die Beschaffenheit der Schneedecke und des Bodens sowie die Wetterlage (Nairz et al. 2011). Auch das Verhalten des Menschen hat einen grossen Einfluss auf das Auslösen einer Lawine. Über Einflussfaktoren der Lawinenbildung, vor allem über die verschiedenen Geländeparameter und deren Auswirkungen, wurde bereits einiges erforscht.

Werden Unfalllawinen allerdings genauer lokalisiert, fällt auf, dass diese zum Teil inmitten eines Hanges hinuntergehen und nicht den Hang rund um die Anrisszone einbeziehen, obwohl dieser ähnliche Geländeeigenschaften aufweist. Warum das so ist und wovon dementsprechend die genaue Ausbreitung der Lawine im Hang abhängt, wurde noch nicht ausreichend untersucht. Auch wurden bis heute vorwiegend die Anrisszonen alleine und nicht das Gelände rundherum erforscht.

Der Auslöseprozess von Lawinen stellt also einen komplizierten Vorgang dar, auf welchen viele unterschiedliche Faktoren einwirken. Einige davon sind die Geländeparameter des zugehörigen Hanges, welchen mehr Beachtung geschenkt werden soll. Damit können möglicherweise neue Erkenntnisse über Unfalllawinen gewonnen werden und im besten Fall für mehr Sicherheit auf Skitouren sorgen.

## 1.2. Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, Anrisszonen und deren Ausbreitung im Hang detailliert zu untersuchen. Dafür soll eine Methode entwickelt werden, die Hänge rund um Anrisszonen extrahiert, welche sich in den Geländeeigenschaften nicht wesentlich von den Anrisszonen unterscheiden. Die ermittelten Hang-Eigenschaften sollen anschliessend mit jenen der Anrisszonen verglichen werden. Auch sollen die Hänge evaluiert und der Einfluss der einzelnen Parameter auf die Hangausbreitung untersucht werden.

Als Forschungsfrage, um oben genanntes Ziel zu erreichen, wurde folgende festgelegt:

**Warum existieren Lawinen, deren Anriss mitten im Hang endet und nicht den Hang rundherum einbezieht, obwohl dieser ähnliche Geländeeigenschaften aufweist?**

Um sich an diese Forschungsfrage heranzutasten, sollen drei spezifischere untergeordnete Fragen dienen:

- Frage 1: Wie können Hänge definiert und folglich aus einem DHM extrahiert werden?
- Frage 2: Wo liegen die Möglichkeiten und Schwierigkeiten einer automatischen Hang-Extraktion?
- Frage 3: Inwiefern sind Zusammenhänge zwischen den generierten Hang-Daten und den schon bestehenden Daten aus der SLDB erkennbar?

## 1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist wie folgt aufgebaut: Das nächste Kapitel erklärt die Grundlagen der Thematik Lawinen und zeigt auch den aktuellen Forschungsstand generell zu Lawinen als auch zu den in dieser Arbeit untersuchten Unfalllawinen, welche Schneebrettlawinen darstellen, auf. Ausserdem erfolgt die grundlegende Theorie zum Forschungsfeld der Geomorphometrie inklusive Diskussion von Höhenmodellen. Des Weiteren wird das Basiswissen für die verwendeten GIS-Ansätze geliefert. Das dritte Kapitel setzt den Rahmen dieser Arbeit fest, indem verwendete Daten, Informationen zum Untersuchungsgebiet sowie benutzte Software besprochen wird. Im Kapitel Methodik wird Schritt für Schritt erklärt, welche Ansätze in dieser Arbeit wie integriert wurden, gefolgt vom Kapitel Resultate, welches die in dieser Arbeit ermittelten Ergebnisse aufzeigt. Das sechste Kapitel stellt die Diskussion der Ergebnisse sowie deren Einbezug in die untergeordneten Fragen als auch in die Forschungsfrage dar. Das Kapitel Schlussfolgerungen rundet mit Erkenntnissen und einem Ausblick in die Zukunft die Arbeit ab.

## 2 Grundlagen

Der Auslöseprozess von Lawinen stellt eine komplexe Thematik dar. Er wird durch viele Faktoren beeinflusst. Um diesen Prozess besser zu verstehen und um abschätzen zu können, wo Anrisszonen von Unfalllawinen auftreten können und welche Geländeeigenschaften entscheidend sind, ist grundlegendes Wissen über Lawinen Voraussetzung.

Dieses Kapitel ist in vier Teile gegliedert: Der erste Teil zeigt die Theorie zum Thema Lawine, vor allem der Schneebrettlawine, auf und beinhaltet andere bereits vollzogene GIS-Ansätze im Bereich Lawinen. Der zweite Teil stellt die Grundlagen des Forschungsgebietes der Geomorphometrie vor und geht näher auf Digitale Höhenmodelle ein, welche die Ausgangsdaten für geomorphometrische Untersuchungen liefern. Im dritten Teil werden bestehende GIS-Ansätze besprochen, welche bei geomorphologischen Klassierungen verwendet werden, vor allem der Region-Growing-Algorithmus wird näher erläutert. Im abschliessenden Kapitel folgen die bestehenden Forschungslücken.

### 2.1 Lawinen

In diesem Kapitel wird die Theorie betreffend Lawinen dargelegt. Thematisiert werden die verschiedenen Komponenten wie Schnee, die lawinenbildenden Faktoren, Lawinenklassifikationen, vor allem die Schneebrettlawine selbst, sowie Einflüsse anderer Parameter auf die Lawinenbildung.

#### 2.1.1 Schnee

Eiskristalle bilden sich in der Atmosphäre und fallen anschliessend vom Himmel (Harvey, Rhyner, et al., 2012). Nach der Ablagerung beginnen diese Schneekristalle sich miteinander zu verbinden. Genau diese Bindung ist relevant für die Festigkeit des Schnees und damit entscheidend für das Lawinenrisiko. Je nach Anzahl der Bindungen im Schnee lässt sich dieser unterschiedlich leicht brechen: Während Neuschnee mit wenigen Bindungen und viel Hohlraum dazwischen als leicht brechbar gilt, hält Schnee mit kleinen, runden Körnern viel besser zusammen. Das sogenannte Sintern (Zusammenwachsen verschiedener Eiskristalle) ist von der im Schnee herrschenden Temperatur abhängig. Ist diese warm (um die 0°C), kleben Eiskristalle viel schneller aneinander als bei kaltem Schnee (-10°C). Allerdings können aufgrund des Eigengewichts Bindungen zwischen Eiskörnern immer wieder brechen. Solange dies nur vereinzelt Bindungen betrifft und parallel dazu neue Bindungen entstehen, stellt dies kein Problem dar. Erst wenn alle Bindungen gleichzeitig brechen, führt dies zu einer Rissbildung, welche sich fortpflanzen und zu einer Schneebrettlawine führen kann. Durch eine solche Schneenumwandlung, Metamorphose genannt, verändern Eiskörner und Bindungen ihre Form und Grösse. Unter dem Einfluss des Wetters und der Metamorphose verändert sich die Schneedecke über den ganzen Winter hinweg. Je unterschiedlicher die verschiedenen Schichten einer Schneedecke sind, desto grösser ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Schneebrettlawine abgeht. Dazu muss allerdings eine Schwachschicht in der Schneedecke vorhanden sein. Diese besteht aus einer Struktur mit grossen Hohlräumen, welche nur wenige Bindungen zwischen den grossen Schneekristallen aufweist. Folglich ist eine Schwachschicht bruchanfällig, da die wenigen Bindungen leicht brechen können (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

## 2.1.2 Lawinenbildende Faktoren

Entscheidend für das Auslösen von Lawinen sind die drei sogenannten lawinenbildenden Faktoren: Verhältnisse, Gelände und Mensch. Meistens ist eine Kombination dieser Schlüsselfaktoren entscheidend (Harvey, Rhyner, et al., 2012). In den folgenden Abschnitten werden diese drei Bereiche der lawinenbildenden Faktoren genauer erläutert.

Der Teilbereich **Verhältnisse** beinhaltet die Themen Gefahrenstufe, Alarmzeichen sowie das Wetter. Täglich wird den Schneesportlern ein Lawinenlagebericht vom SLF (in der Schweiz das sogenannte „Lawinenbulletin“) zur Verfügung gestellt. Dieser ordnet die aktuelle Lawinengefahr pro Tag einer der fünf europäischen Lawinengefahrenstufen zu. Wie der Abbildung 2.1: zu entnehmen ist, existieren fünf Stufen mit dazugehörigen Farben (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

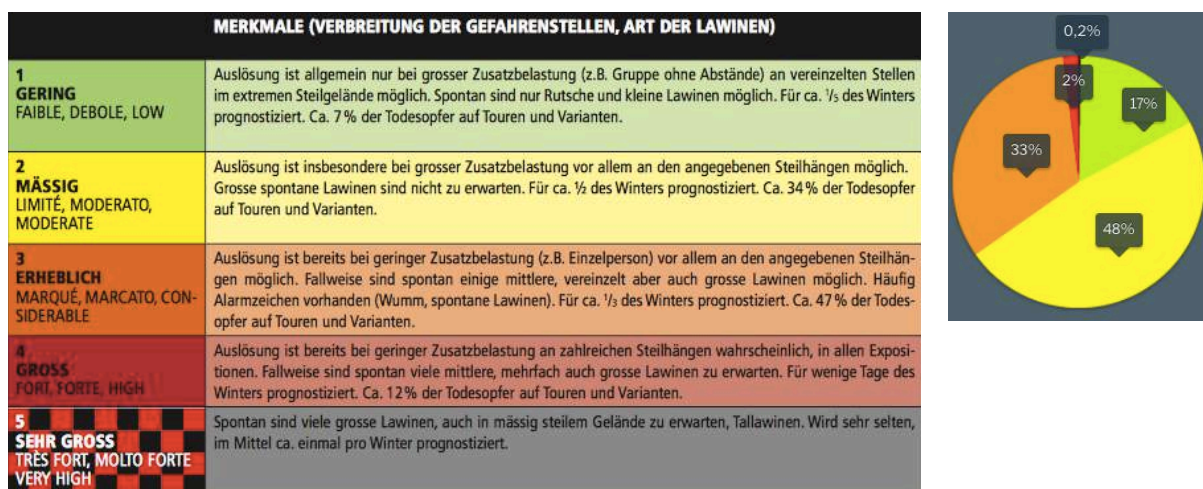


Abbildung 2.1: Lawinengefahrenstufen (Harvey, Schweizer, et al., 2012) und deren prozentuales Vorkommen (WhiteRisk, o.J.-a)

Die durch diese Stufen beschriebene Lawinengefahr gilt allerdings nicht für Einzelhänge sondern für Regionen (WhiteRisk, o.J.-a). Je höher die Gefahrenstufe, desto instabiler die Schneedecke, desto kleiner ist die nötige Zusatzlast für eine Auslösung, desto mehr Gefahrenstellen sind vorhanden und desto mehr und grössere Lawinen sind zu erwarten (WhiteRisk, o.J.-a). Die Abbildung 2.1: rechts zeigt die Verteilung der prognostizierten Gefahrenstufen im Lawinenbulletin der Schweizer Alpen für die Jahre 1997/98 bis 2009/10 auf. Obwohl die Stufe *mässig* häufiger auftritt, gilt als gefährlichste Stufe für den Menschen die Stufe *erheblich*. Da es sich dabei „nur“ um die mittlere Stufe handelt, wird diese von den Wintersportlern oft unterschätzt. Trotz der erhöhten Lawinengefahr unternehmen Menschen ihre Skitouren, deswegen passieren etwa die Hälfte aller Unfälle bei dieser Gefahrenstufe (vergleiche Abbildung 2.1: links, Stufe *erheblich*) (Harvey, Rhyner, et al., 2012). Neben dieser Stufen-Zuteilung werden für Grossregionen auch kritische Hangexpositionen sowie Höhenlagen erwähnt. Diese sind dem Lawinenbulletin in Abbildung 2.2 und Abbildung 2.3 zu entnehmen.



## Gebietsweise kritische Lawinensituation

Ausgabe: 10.1.2016, 08:00 / Nächster Update: 10.1.2016, 17:00

### Lawinengefahr

Aktualisiert am 10.1.2016, 08:00

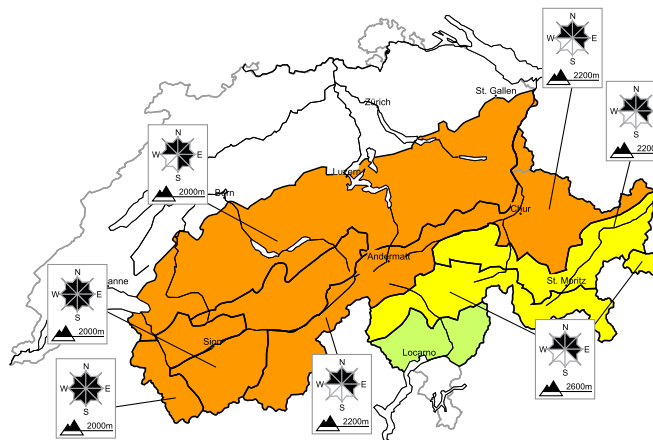


Abbildung 2.2: Lawinenbulletin für den 10. Januar 2016 (SLF, 2016)

Zu erkennen ist, dass in den nördlichen Voralpen als auch in den Alpen überwiegend die Stufe *erheblich* auftritt. Im Gebiet C herrschen an diesem Tag kritische Bedingungen in den Hangexpositionen West über Norden nach Süden ab einer Höhe von 2000 m ü. M. (siehe Abbildung 2.3). Für jede Grossregion wird ausserdem ein Fliests-text über die aktuelle Lage verfasst. Angefügt ist das Beispiel für die nördlichen Voralpen.



<b>Gebiet C</b>	<b>Erheblich, Stufe 3</b>
	
<b>Triebschnee, Altschnee</b>	
<b>Gefahrenstellen</b> 	<b>Gefahrenbeschreibung</b> Die frischen Trieb Schneeeansammlungen sind meist gut erkennbar aber störanfällig. Die frischen und älteren Trieb Schneeeansammlungen überlagern an Schattenhängen oberhalb von rund 2200 m eine schwache Altschneedecke. Lawinen können schon von einzelnen Wintersportlern ausgelöst werden und mittlere Grösse erreichen. Wummgeräusche und Risse beim Betreten der Schneedecke können auf die Gefahr hinweisen. Touren erfordern Erfahrung in der Beurteilung der Lawinengefahr.
<b>Nasse Lawinen</b>	
Es sind unterhalb von rund 2000 m einzelne feuchte Rutsche und Lawinen möglich.	

Abbildung 2.3: Lawinenbulletin, genauere Beschreibung für Grossregionen (SLF, 2016)

Der Lawinenlagebericht dient als Prognose für Tourenplanungen, eigenes Mitdenken sollte aber auf keinen Fall fehlen (Harvey, Rhyner, et al., 2012). Auch während der Tour sollte auf sogenannte Alarmzeichen geachtet werden, dies können zum Beispiel frische Lawinen sein. Falls solche im Gelände zu sehen (oder zu hören) sind, herrschen folglich Bedingungen, welche zu Lawinen führen können. Sind allerdings keine frischen Lawinen vorhanden, heisst dies noch lange nicht, dass die Bedingungen dazu nicht herrschen. Auch das Wetter hat einen entscheidenden Einfluss auf die Lawinengefahr. Bei viel Neuschnee (definiert als Schnee, der in den letzten drei Tagen gefallen ist)

oder starkem Wind wird die Schneedecke zusätzlich belastet und das Lawinenrisiko steigt an. Auch erhöhte Sonneneinstrahlung und dementsprechend Erwärmung kann die Gefahr erhöhen. Ebenfalls hat die Sicht einen Einfluss. Durch schlechte Sicht nimmt das Beurteilungsvermögen der Wintersportler ab, und es ist schwieriger, eine Situation richtig einzuschätzen (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

Ein zweiter Teilbereich der lawinenbildenden Faktoren stellt das **Gelände** dar. Einerseits ist die Steilheit relevant und andererseits spielen Exposition und Höhenlage eine Rolle (Harvey, Rhyner, et al., 2012). Die Steilheit für mögliche Anrisszonen wird zwischen 30° und 60° Neigung festgesetzt. Unter 30° ist die Schwerkraft nicht gross genug, um eine Lawine auszulösen, während über 60° kaum Schneeablagerungen stattfinden (Maggioni & Gruber, 2003). Grundsätzlich gilt jedoch: Je steiler ein Hang, umso gefährlicher die Situation. Betreffend Höhenlage und Exposition sind Lawinen vor allem oberhalb der Waldgrenze an schattigen Hängen zu finden. Über der Waldgrenze bläst stärkerer Wind, die Temperaturen nehmen ab während der Niederschlag tendenziell zunimmt. Wie bereits thematisiert werden im Lawinenbulletin explizit gefährliche Höhenlagen und Expositionen pro Grossregion erwähnt (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

Beim dritten Teilbereich steht der Faktor **Mensch** im Zentrum. Nur etwa fünf Prozent von Lawinenunfällen passieren spontan, was heisst, dass sie von keinem Menschen ausgelöst wurden. Dementsprechend wird in den meisten Fällen die Lawine vom Betroffenen selbst oder von dessen Begleitern ausgelöst. Das Verhalten des Menschen auf einer Skitour hat folglich grosse Wirkung auf die Wahrscheinlichkeit des Auslösens von Lawinen. Je grösser eine Gruppe, desto grösser ist auch das Risiko einer Lawinenauslösung. Dies hat mehrere Gründe: Erstens wird die Schneedecke mehr belastet. Zweitens ist davon auszugehen, dass jedes Gruppenmitglied eine neue Spur fahren möchte und folglich die Wahrscheinlichkeit ansteigt, auf eine kritische Stelle zu treffen. Des Weiteren fallen Entscheidungen langsamer, da mehr Meinungen vorhanden sind, was ebenfalls die Kommunikation erschwert. Als letzter Punkt ist zu nennen, dass, wenn einige Menschen zusammen unterwegs sind, fälschlicherweise ein Sicherheitsgefühl herrscht, welches zu risikoreicherem Verhalten führen kann (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

Es existieren einige Verhaltensregeln, welche auf Skitouren zu beachten sind (Harvey, Rhyner, et al., 2012):

- Konvexe Gelände (Erhabene Formen) sind sicherer zu befahren als konkave, folglich gilt: Erhebungen bevorzugen, Mulden meiden.
- Im Auf- und Abstieg sollte zwischen den verschiedenen Tourengängern ein Sicherheitsabstand vorhanden sein.
- Das Befahren von Steilhängen sowie Schlüsselstellen sollte alleine erfolgen.
- Anhalten und Warten auf andere Gruppenmitglieder sollte an sicheren Orten passieren (z.B. nicht am Fuss eines Steilhangs).

### 2.1.3 Typische Lawinensituationen – Lawinenklassifikation

Es gibt vier verschiedene Lawinentypen (Harvey, Rhyner, et al., 2012): Schneebrettlawinen, Lockerschneelawinen, Gleitschneelawinen und Nassschneelawinen. In dieser Arbeit wird vor allem auf die Schneebrettlawine eingegangen, da diese oftmals vom Menschen ausgelöst wird. Sie wird

deshalb, anschliessend an kurze Erläuterungen zu den anderen drei Typen, genauer beschrieben werden.

Im Vergleich zu Schneebrettlawinen, welche linienförmig brechen, gehen **Lockerschneelawinen** punktförmig ab. Lockerschneelawinen werden immer grösser beim Hinunterstürzen, da sich immer mehr Schnee ansammelt. Der Schnee in diesem Lawinentyp gilt als unverfestigt mit schwachen Bindungen zwischen den Eiskristallen. Dieser Typ tritt am häufigsten nach neuem Schneefall auf. Bei **Gleitschneelawinen** rutscht die gesamte Schneedecke am Boden ab. Im Vergleich zur Schneebrettlawine passiert die Gleitschneelawine spontan, es ist keine Zusatzlast nötig. Das Abrutschen hängt mit grossflächigem Reibungsverlust zusammen (z.B. auf Gras oder einer Felsplatte). Bei **Nassschneelawinen** muss ein Teil des Schneebretts im Anrissgebiet durch Regen oder durch Schneeschmelze nass geworden sein. Durch diesen höheren Wassergehalt in der Schneedecke nimmt die Stabilität ab und die Lawine bricht wie die Schneebrettlawine bei einer Schwachschicht. Es gilt die Faustregel: Je nasser der Schnee umso flacher kann das Gelände sein, in dem eine Nassschneelawine niedergeht (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

### Schneebrettlawinen

Die grösste Gefahr für den Menschen stellt die Schneebrettlawine dar. Sie löst sich brettartig und ein Entkommen aus der Lawine ist meist unmöglich (Harvey, Rhyner, et al., 2012). Eine Schneebrettlawine ist in drei Zonen einzuteilen: Anrissgebiet, Sturzbahn und Ablagerungsgebiet. Die genauen Definitionen sind der Abbildung 2.4 zu entnehmen.

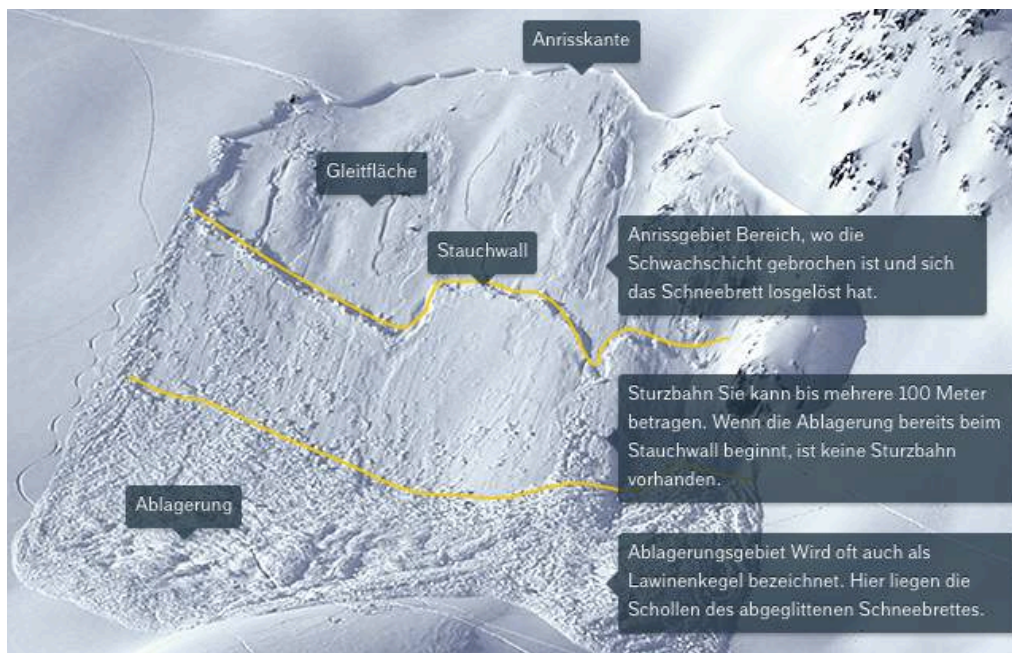


Abbildung 2.4: Bereiche einer Schneebrettlawine (WhiteRisk, o.J.-b)

Schneebretter sind für Schneesportler sehr gefährlich, da durch wenig Zusatzlast eine Unmenge von Schnee rutschen kann. Eine von Schneesportlern ausgelöste Schneebrettlawine ist durchschnittlich 50 m breit, 200 m lang und 50 cm mächtig. Sie kann einen Menschen mitreissen, sodass dieser abstürzt oder verschüttet wird, was zum Erstickungstod führen kann (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

Damit eine Schneebrettlawine ausgelöst wird, muss ein Bruch in der Schneedecke sowie ein Schneebrett vorhanden sein. Solche Brüche entstehen durch das Kollabieren von Schwachschichten aufgrund der kombinierten Scher- und Druckbelastung. Wegen des Zusammenbrechens der Schwachschicht senkt sich der Schnee lokal ab, was wiederum Energie zur Bruchfortpflanzung freisetzt. Bei einer Schneebrettauslösung existieren drei verschiedene Phasen: Die Bruchbildung und Initiierung, die Bruchfortpflanzung sowie das Abgleiten des Schneebretts (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

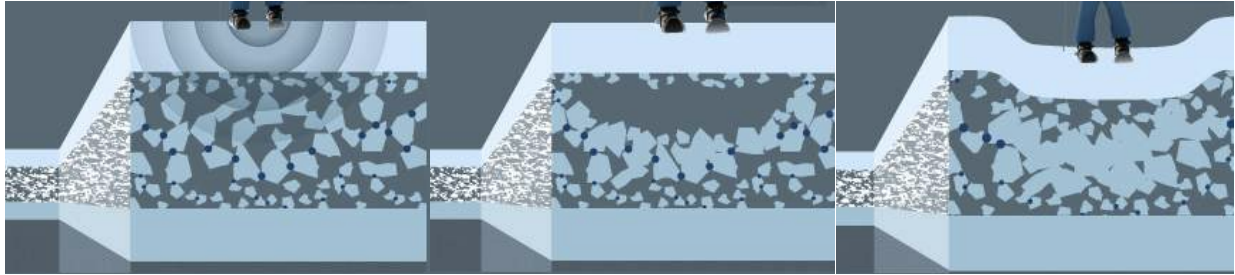


Abbildung 2.5: Von der Bruchinitiierung zur Bruchfortpflanzung (WhiteRisk, o.J.-c)

Bei der **Bruchbildung** muss eine Schwachschicht vorhanden sein. Diese kann durch Zusatzlast wie zum Beispiel einen Skifahrer gebrochen werden. Dafür darf die Schwachschicht allerdings nicht zu tief unter der Oberfläche liegen (weniger als 1m tief) (Harvey, Rhyner, et al., 2012), sonst ist die Krafteinwirkung des Skifahrers zu gering (WhiteRisk, o.J.-c). In Abbildung 2.5 links ist so eine Zusatzlast durch einen Skifahrer zu erkennen. Allerdings ist neben der Tiefe auch die Schichtung oberhalb der Schwachschicht entscheidend dafür, ob in der Schwachschicht Brüche aufgrund des Skifahrers entstehen (Abbildung Mitte). Ist die gebrochene Stelle genügend gross, findet eine **Bruchfortpflanzung** statt. Das Brett senkt sich an der Bruchstelle ab und setzt Energie frei (Abbildung rechts). Durch diese freigesetzte Energie können auch stabilere Bereiche brechen, bei welchen durch Schneesportler alleine kaum Bruchbildung möglich wäre. In der dritten Phase **gleitet das Schneebrett ab**. Die Reibung entscheidet darüber, ob bei einem grossflächigen Bruch eine Lawine niedergeht. Hier gilt: Je steiler der Hang, umso höher die Wahrscheinlichkeit für einen Lawinenniedergang (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

Geeignet für die Bildung von Schneebrettlawinen ist weicher, gebundener Schnee, „warmer“ oder auch dichter, harter Schnee. Je mächtiger ein Schneebrett ist, desto mehr Zusatzlast ist nötig, um dieses in Bewegung zu setzen (z.B. ein Pistenfahrzeug). Ein Schneesportler kann dieses Schneebrett aber möglicherweise da auslösen, wo es weniger mächtig ist, und durch die Bruchfortpflanzung wird die nötige Energie freigesetzt, um das ganze Brett zu bewegen. Auch wenn Schneebretter in der Schneedecke vorhanden sind, können diese ohne Schwachschicht darunter nicht ausgelöst werden. Ist eine Schneedecke betreffend ihrer Eigenschaften sehr variabel, kann sich schlecht eine Schneebrettlawine bilden. Dazu wird bei Harvey, Rhyner, et al. (2012) ein gutes Beispiel gegeben: Steht beim Umfallen von Dominosteinen ein massiver Bauklotz im Weg, so werden die Dominosteine gebremst. Weist eine Schneedecke also grosse Variabilität auf (innerhalb von 10 m), kann kaum eine Schneebrettlawine entstehen und abgleiten.

In mehreren Papers werden generell Lawinen und nicht explizit Unfalllawinen untersucht. Vontobel (2011) definiert Unfalllawinen als kleine bis mittlere Schneebrettlawinen, welche entweder durch Personen ausgelöst wurden oder Personenschaden verursacht haben, was auch natürliche sowie durch Sprengungen oder Pistenfahrzeuge freigesetzte Lawinen miteinschliesst. Harvey (2002) erklärt die Unterschiede zwischen natürlichen und vom Menschen ausgelösten Lawinen in Bezug auf Länge, Breite und Bruchtiefe. Über 80% des Geländes, wo Lawinen abgehen, sind Mulden, Rinnen, steinigtes Terrain sowie Gebiete nahe beim Kamm. Nach Schweizer & Lutschg (2001) handelt es sich bei Unfalllawinen vorwiegend um Schneebrettlawinen. Diese sich lösenden Schneebretter sind im Durchschnitt etwa 50 m breit und 80 m lang, über den zurückgelegten Pfad hinweg gesehen etwa 150 m lang. Die Bruchtiefe liegt bei 45 cm. Neben Länge, Breite und Tiefe wird bei Schweizer & Lutschg (2001) auch die Schneedecke bei den Anrisszonen auf den Grund des Versagens hin untersucht. Die Masterarbeit von Vontobel (2011), welche als Grundlage für diese Arbeit dient, handelt von Schweizer Unfalllawinen, bei welchen mit Hilfe von deskriptiver Statistik einzelne Parameter analysiert wurden, die Einfluss auf Lawinenabgänge haben. Es wurde die durchschnittliche Länge und Breite der durch Personen ausgelösten Lawinenan- und Lawinenumrisse ermittelt: Die Anrisse sind im Mittel 65 m breit und 85 m lang, die Umrisse weisen eine mittlere Breite und Länge von 85 m und 250 m auf. Des Weiteren wurden die typischen Höhenlagen von Unfalllawinen erforscht (2000 m bis 3000 m). Bezüglich Exposition ist auffällig, dass vor allem in Nord, Nordwest und Nordost vermehrt Unfalllawinen auftreten. Die Nähe zum Kamm wurde für Anrisszonen ebenfalls untersucht. Da nirgendwo festgelegt war, was als kammnah gilt, wurde bei Vontobel (2011) 100 m als Schwellenwert festgelegt. Mit diesem Wert werden etwa 1/3 aller Unfalllawinen in Kammnähe ausgelöst. Ebenfalls untersucht wurde die Geländeform. Die meisten Unfalllawinen fanden in Gelände mit konkaver Plan- sowie konkaver Profilkurvatur statt. Auch gut vertreten sind Geländeformen mit gerader Profilkurvatur und konkaver Plankurvatur sowie der umgekehrte Fall mit konkaver Profilkurvatur und gerader Plankurvatur als auch in beide Richtungen planar. Mit Hilfe der Rauigkeit konnte die mögliche Oberflächenbeschaffenheit bei Lawinenabgängen bestimmt werden. Diese ist meist geröllbedeckt sowie leicht uneben. Der Parameter Exponiertheit wurde in vier Klassen eingeteilt: Hangfusslage, Muldenlage, Hangmitte und Kammlage. Die meisten Anrissgebiete lagen in der Hangmitte. Die durchschnittliche Hangneigung in den Anrissgebieten beträgt zwischen 25° und 45°. Abschliessend wurde auch der Zusammenhang zwischen obengenannten Parametern bestimmt.

#### **2.1.4 Einfluss der Schneedecke und der Geländeparameter**

Deems et al. (2002) untersuchten die topographischen Einflüsse auf Schneegradienten in der Schneedecke. Dies soll künftigen Schneedecken-Simulationen dienen, welche für Lawinen verwendet werden können. Dafür wurden 30 verschiedene Standorte festgelegt, welche an jedem Messtag erneut besucht wurden. Die Gradienten wurden dort anhand von Temperaturen in der Tiefe der Schneedecke (in mindestens 30 cm Tiefe) ermittelt. Es wurde gezeigt, dass die Temperaturgradienten in Schneedecken in Beziehung mit der Topographie, der Sonneneinstrahlung und der Vegetation stehen. Dort, wo die höchste Einstrahlung herrscht (= Südhang), ist der maximale Temperaturgradient am kleinsten.

Steinkogler et al. (2014) haben den Einfluss der Schneedeckeneigenschaften auf die Dynamik einer Lawine untersucht mit Hilfe von „SNOWPACK“ sowie „Alpine3D“. Das Modell SNOWPACK

wurde ursprünglich für die Lawinenwarnung entwickelt, wird aber heutzutage wegen der Genauigkeit auch im Bereich der Klimaforschung verwendet. Es beschreibt die Schichtung der Schneedecke sowie die Mikrostruktur. Folglich werden Schwachschichten sowie Schichtgrenzen aufgezeigt (SLF, o.J.-a). Bei „Alpine3D“ handelt es sich ebenfalls um ein Modell des SLF. Alpine3D greift auf das Snowpack-Modell zurück. Während letzteres nur eine 1D-Energiebilanz erstellt, wird beim Alpine3D-Modell die Energiebilanz für einen grösseren Bereich und für mehrere Zeiten errechnet (SLF, o.J.-b). Steinkogler et al. (2014) konnten aufzeigen, dass Lawinen, welche dem gleichen Pfad folgen sowie ähnliches Anrissvolumen aufzeigen, unterschiedliche Auslaufdistancen aufweisen aufgrund unterschiedlicher Mitreiss-Tiefen. Auch wurde ein klarer Zusammenhang gefunden zwischen Volumen und Auslaufstrecke: Je mehr Volumen, desto grösser die Distanz.

Guy & Birkeland (2013) haben Schwachschichten in Schneedecken untersucht. Um Lawinen vorherzusehen und um mögliche Anrisszonen zu ermitteln, ist es wichtig zu verstehen, wie sich Schwachschichten unmittelbar auf das Abgehen von Schneebrettern auswirken. Normalerweise stellen Tiefen- sowie Oberflächenreif als auch Oberflächenfacetten die Schwachschichten dar. Es ist allerdings schwer, die räumliche Verteilung dieser Schwachschichten exakt zu ermitteln. In früheren Studien wurden bereits Schwachschichten untersucht, doch fand der Einbezug von Geländeparametern dann nur unterhalb der Baumgrenze statt. Die beiden Autoren zeigen auf, wie komplex und unterschiedlich von Fall zu Fall der Einfluss der Geländeparameter auf Schwachschichten ist und demzufolge auf mögliche Anrisszonen. Das Gelände beeinflusst die Schneedecke bei jeder Lawine anders und deshalb ist bei Extrapolationen Vorsicht geboten.

Neben dem Untersuchen der Schneedecke stellt ein weiteres wichtiges Feld in der Lawinenforschung die Untersuchung der Geländeparameter dar. Maggioni & Gruber (2003) untersuchten ihren Einfluss auf Anrisszone und Anrisshäufigkeit. Als Parameter zur Ermittlung von möglichen Anrisszonen wurden Wald/kein Wald, Steilheit, Exposition, Krümmung (Plankrümmung), Nähe zum nächsten Kamm sowie Grösse untersucht. Als Resultat hielten sie fest, dass je nach unterschiedlichen Parametern auch eine unterschiedliche Lawinenaktivität herrscht. Wald dient als Schutz, dementsprechend wird dort der Abgang von Lawinen im Allgemeinen verhindert. Die Steilheit für mögliche Anrisszonen wird zwischen  $30^\circ$  und  $60^\circ$  festgesetzt. Unter  $30^\circ$  ist die Schwerkraft nicht gross genug, um eine Lawine auszulösen, während über  $60^\circ$  Schneeablagerungen kaum stattfinden. Die Krümmung wird in zwei verschiedene Richtungen eingeteilt, einerseits in die Profilkrümmung (vertikal), andererseits in die Plankrümmung (horizontal). Die Plankrümmung wurde verwendet, um grossräumig konkave von konvexen Gebieten zu unterscheiden. Der Parameter „Nähe zum Kamm“ ist entscheidend für die Windverhältnisse und hat dementsprechend Auswirkungen auf mögliche Schneeverwehungen.

Mehrere Autoren (Maggioni & Gruber, 2003; Gruber Schmid & Sardemann, 2003) untersuchten aufgrund vergangener Ereignisse mögliche künftige Anrisszonen sowie künftige Pfade. Auch die Auslaufgebiete stellen in der Forschung eine wichtige Thematik dar, im Paper von Gruber Schmid & Sardemann (2003) wurde mit Hilfe vergangener Ereignisse ein Modell entwickelt, mit welchem das Auslaufgebiet einer Lawine errechnet werden kann. Um genaue Daten von Lawinen zu ermitteln, sodass diese in ein Modell verarbeitet werden können, dient das Testgebiet des SLF „Vallée de la Sionne“ im Wallis, wo Messungen an künstlichen Lawinen stattfinden (Turnbull & McElwaine, 2007).

## 2.2 Geomorphometrie

Geomorphometrie stellt die Wissenschaft der quantitativen Oberflächenanalyse der Landschaft dar (Romstad & Etzelmüller, 2012). Bei der Geomorphometrie handelt es sich um ein interdisziplinäres Feld, welches aus Mathematik, Erdwissenschaften und Computerwissenschaften entstanden ist (siehe Abbildung 2.6) (Pike et al., 2009). Heutzutage findet es auch in vielen Bereichen der Geographie Anwendung (Romstad & Etzelmüller, 2012). Sein Hauptanliegen liegt in der Extraktion von Oberflächenparametern und Objekten aus dem Digitalen Höhenmodell (Pike et al., 2009). Am häufigsten werden dabei die Parameter Neigung, Exposition und Krümmung abgeleitet und anschliessend in Bereichen wie Vegetationsgeographie, Permafrost oder Lawinenmodellierung eingesetzt (Philipps Universität Marburg, 2011).

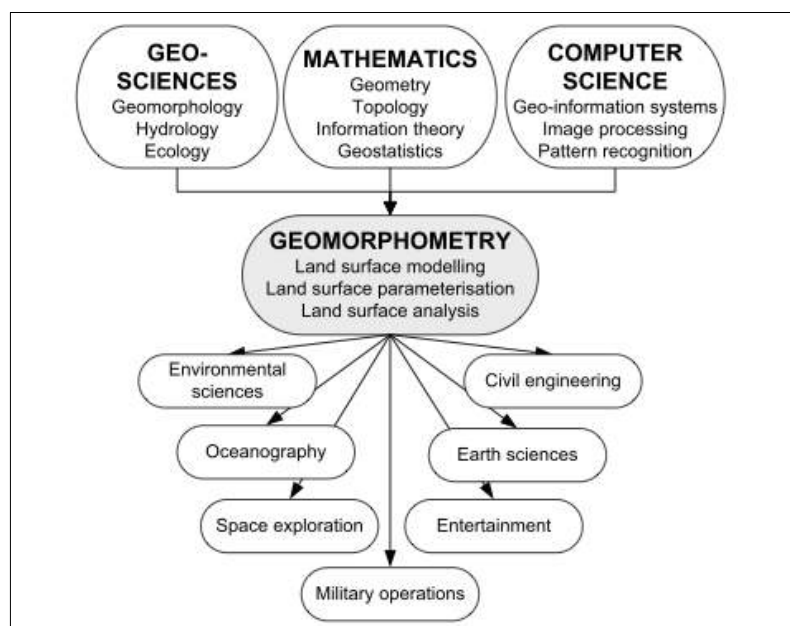


Abbildung 2.6: Ursprünge und Teilbereiche der Geomorphometrie (Pike et al., 2009)

In der Geomorphometrie wird zwischen zwei Methoden unterschieden, wie die Erdoberfläche analysiert wird (Pike et al., 2009): Spezifisch oder generell. „Spezifisch“ behandelt einzelne Oberflächengegebenheiten (zum Beispiel Landformen), während „generell“ die kontinuierliche Erdoberfläche behandelt. Als Input für eine solche Analyse dient folglich ein Digitales Höhenmodell in Rasterform.

In Abbildung 2.7 sind die fünf Schritte zur Implementierung der Geomorphometrie aufgezeigt. Die Schritte eins bis drei sind in dieser Arbeit nicht mehr durchzuführen, da bereits DHM zur Nutzung vorhanden sind. Der vierte Schritt ist in dieser Arbeit relevant, da Hänge als Objekte erkannt werden sollen aufgrund von Parametern wie Neigung und Exposition. Als fünfter und letzter Schritt sollen diese Hänge extrahiert werden.

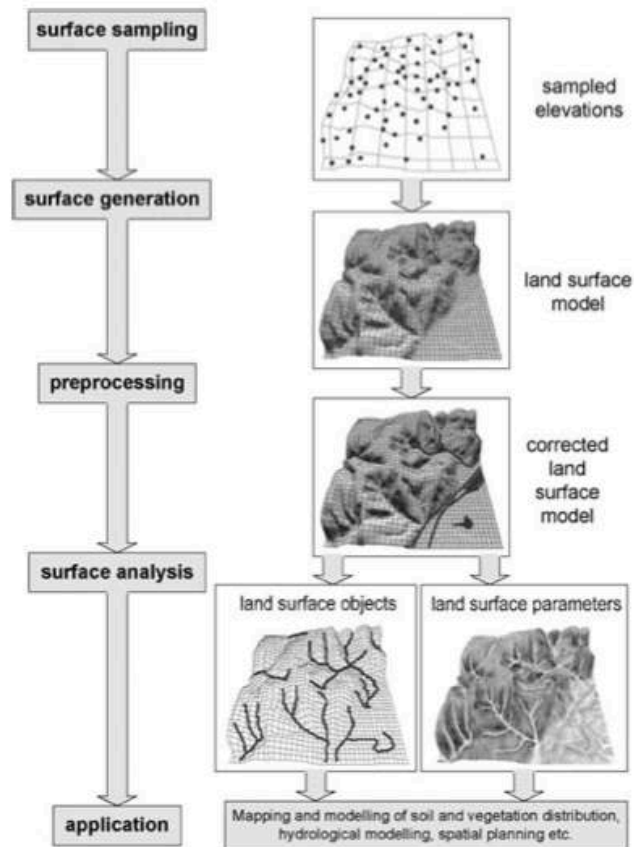


Abbildung 2.7: Entstehung und Weiterverwendung des DHMs in der Geomorphometrie (Pike et al., 2009)

Die sogenannten *land surface parameters* (auf deutsch: Reliefparameter) stellen ein deskriptives Mass der Oberflächenform dar (zum Beispiel Neigung, Exposition, Feuchtigkeitsindex). Es handelt sich dabei normalerweise um kontinuierliche Werte in Form einer Rasteranordnung (Pike et al., 2009). Es wird zwischen primären und sekundären *land surface parameters* unterschieden, indem erstere direkt dem Höhenmodell entnommen werden können (zum Beispiel Neigung, Krümmung, Exposition), während für weitere weitere Verarbeitung oder andere Inputs, wie mehrere primäre Parameter, nötig sind (zum Beispiel topographischer Feuchtigkeitsindex) (Wilson & Gallant, 2000). Im Gegensatz dazu stellen *land surface objects* (deutsch: Reliefobjekte) einzelne Objekte dar, welche besser in Vektorkarten in Form von Punkten, Linien und Polygonen repräsentiert werden, die aus dem DHM-Raster extrahiert wurden (Pike et al., 2009).

### 2.2.1 Digitale Höhenmodelle

Wie oben erwähnt, werden in der Geomorphometrie Digitale Höhenmodelle (DHM) als Input verwendet. Diese können auf verschiedene Arten erstellt werden, unterschiedliche Datenformate sowie verschiedene Auflösungen aufweisen. Dennoch widerspiegeln alle die Erdoberfläche. Da DHM eine Repräsentation und nicht eine exakte Abbildung der Landschaft modellieren, bringt die Erstellung eines DHMs auch immer Fehler und Unsicherheiten mit sich.

Der englische Begriff für DHM lautet DEM (Digital elevation model). Dies gilt nach Pike et al. (2009) als Oberbegriff. Denn mit dem LiDAR-System können auch mehrere Oberflächen abgetastet



und anschliessend modelliert werden. Normalerweise handelt es sich hierbei um Oberflächen, welche durch die erste Pulsrückmeldung („first echo“) und die letzte Pulsrückmeldung („last echo“) ermittelt werden. Durch das *first echo* wird das Digitale Oberflächenmodell (DOM) gebildet, welches das gesamte Gelände inklusive Vegetation und Gebäude widerspiegelt. Durch das *last echo* wird das Digitale Geländemodell (DGM; englisch: DTM für *digital terrain model*) interpoliert, welches die Erdoberfläche ohne Bauwerke und Bäume abbildet (Mallet & Bretar, 2009). Dieses wird üblicherweise für geomorphologische Analysen verwendet. Im Bereich der Geomorphometrie verweist der Begriff des DHMs folglich eher auf das DGM.

In den folgenden Abschnitten wird auf die möglichen Eigenschaften der DHM eingegangen. Die Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten Höhenmodelle erfolgt in Kapitel 3.1.

### **Datenformate**

Wie in Abbildung 2.7 bereits gezeigt, werden sämtliche Schritte für die Erstellung eines DHMs benötigt. Damit ein DHM generiert werden kann, muss für jeden Punkt von Interesse dessen Höhe kalkulierbar sein. DHM können in zwei Gruppen eingeteilt werden, einerseits in rasterbasierte oder regelmässige, andererseits in vektorbasierte oder unregelmässige Modelle. Da für das gesamte Gebiet die Höhe vorhanden sein muss, kann jedes DHM in einen Punktdatensatz (x, y, z) transformiert werden (Hengl & Evans, 2009).

### **Datenerfassung**

Nach Nelson et al. (2009) existieren drei verschiedene Methoden zur Datenerfassung für DHM. Die erste Möglichkeit besteht in der Vermessung im Feld mit Hilfe von Theodoliten und Triangulationsmethoden. Zweitens können bereits bestehende topographische Karten digitalisiert und Rasterbilder durch halbautomatische Ansätze als Vektoren gescannt werden. Als dritte Möglichkeit bieten sich Fernerkundungsdaten an.

Aus Kostengründen und um relativ geringen Aufwand zu betreiben wird für die Generierung von DHM-Daten die dritte Möglichkeit verwendet. Nach Nelson et al. (2009) werden in Zukunft vor allem interferometrische Radare sowie LiDAR eingesetzt. Dabei werden Impulse von Flugzeugen oder Satelliten ausgesendet und kurz darauf wieder empfangen. Die Zeit vom Aussenden bis zum Wiederempfangen gibt dabei Informationen über die Oberfläche preis, sofern Position sowie Geschwindigkeit des Flugzeugs bekannt sind.

### **Erstellung**

Nach Pike (2005) gibt es drei Möglichkeiten, die relevanten Punkte für die Erstellung eines DHM anzuordnen. Eine Möglichkeit bietet die Gitterform, meist mit quadratisch angeordneten Zellen (selten auch hexagonale oder trigonale Anordnung). Implizit wird dabei jeder Zelle ein x- und y-Wert zugeteilt, welche zusammen das zugehörige z aufweisen (Pike, 2005). Das z stellt die durchschnittliche Höhe der Zelle dar (Kienzle, 2004). Bei der zweiten Möglichkeit werden die Punkte mittels Triangulationen verbunden, was Triangular Irregular Network (TIN) genannt wird. Diese TINs unterscheiden sich in Form und Grösse je nach Gelände. Die dritte Variante ist die Strukturierung nach Höhen- und Neigungslinien (Pike, 2005).

Trotz viel nötigem Speicherplatz und der Tatsache, dass sie nicht an das Untersuchungsgebiet anpassungsfähig sind, werden heutzutage am häufigsten rasterbasierte DHM verwendet. Dies aufgrund ihrer einfachen Struktur, welche sich am besten eignet, um *land surface parameters* abzuleiten. Ausserdem ist die Struktur sehr einfach nachzubilden, da diese über die Zellengrösse gesteuert wird. Zudem sind diese DHM kompatibel mit den gängigen Bildbearbeitungsalgorithmen (Hengl & Evans, 2009).

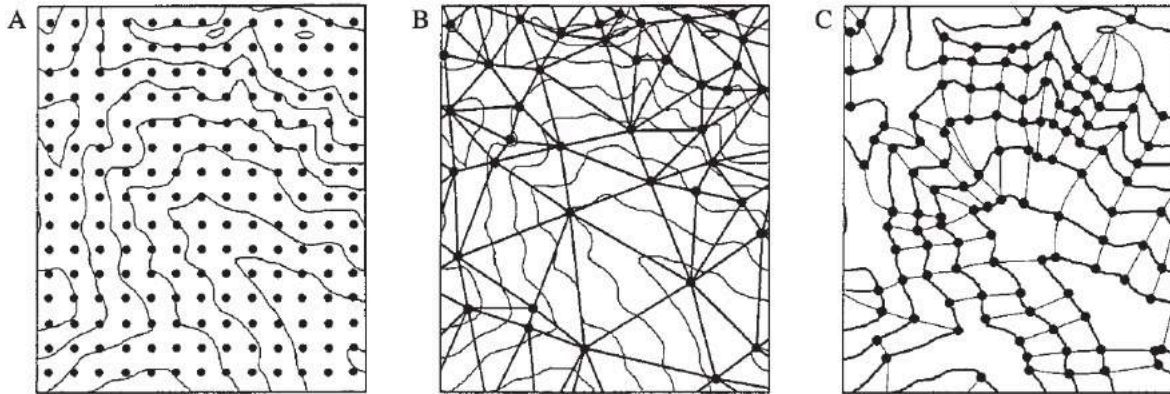


Abbildung 2.8: Die drei üblichen Strukturierungsmethoden für DHM. A: Gitter-/Rasterstruktur; B: TIN; C: Strukturierung nach Höhen- und Neigungslinien (Pike, 2005)

### Auflösung

Ob eine Geländeanalyse mit einem bestimmten DHM realistisch ist, hängt von der Qualität dreier Aspekte ab: Einerseits von der Genauigkeit und der Verteilung der Punkte mit Höhenwerten, andererseits vom Interpolations-Algorithmus, welcher das kontinuierliche DHM aus den vorher genannten Punkten erstellt, sowie von der gewählten Zellengrösse (Kienzle, 2004).

Sowohl die horizontale als auch die vertikale Auflösung eines DHM haben einen entscheidenden Einfluss auf die Genauigkeit der Repräsentation der Topographie (Wilson, 2012). Vor allem die vorher erwähnten LiDAR-Daten liefern eine sehr gute horizontale wie auch vertikale Auflösung. Allerdings sind hochaufgelöste DHM mit hohen Kosten verbunden und auch nicht immer notwendig (Nelson et al., 2009). Hengl & Evans (2009) zeigen auf, dass die nötige Zellengrösse einerseits mit dem untersuchten Gelände zusammenhängt (je flacher, desto grössere Zellenweite möglich) und andererseits, dass die Grösse des zu untersuchenden Objekts eine Rolle spielt. Zu grosse Unterschiede zwischen Zellengrösse (= horizontale Auflösung) und vertikaler Auflösung können zum einen die Berechnung der *land surface parameters* extrem verlangsamen, zum anderen können lokale Artefakte entstehen. Es muss folglich eine möglichst gute Auflösung für das zu repräsentierende Objekt gefunden werden, welche ebenfalls die Komplexität des Geländes erfasst. Allerdings darf die Zellengrösse dennoch nicht zu klein sein, da die Berechnungszeit sowie die Kosten mit zunehmender Anzahl Zellen exponentiell ansteigen.

In Abbildung 2.9 sind drei verschiedene Auflösungen zum gleichen Gelände aufgezeigt. Je kleiner die Zellengrösse, desto genauer wird das Gelände repräsentiert. Zu grosse Zellen (oben links) erscheinen als unrealistisch und wichtige Details des Geländes werden übergangen. Für die Wahl der Auflösung dient das Nyquist-Shannon-Abtasttheorem. Dieses besagt in Bezug auf die DHM-Auflösung, dass Zellengrössen mindestens doppelt so fein gewählt werden sollten wie das darzustellende Objekt (Hengl & Evans, 2009).

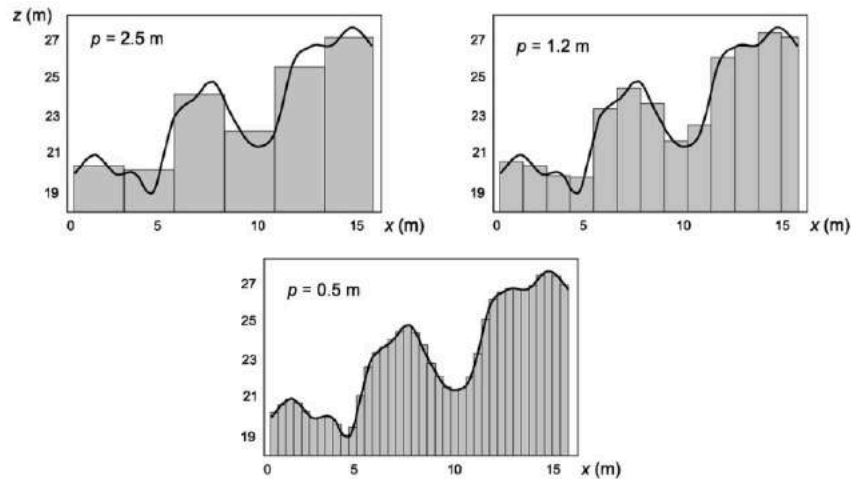


Abbildung 2.9: Einfluss der Zellengrösse  $p$  auf die Topographie (Hengl & Evans, 2009)

### Unsicherheiten und Fehler

Ein weiterer wichtiger Schritt nach der Erstellung eines DHMs ist das Korrigieren von Fehlern und Artefakten im Geländemodell (Wilson, 2012). Nach Tate & Fisher (2006) können drei verschiedene Fehlerquellen unterschieden werden: (1) Quellfehler, welche beim Sammelprozess, beim Aufnehmen, bei der Generalisierung, bei der Symbolisierung oder beim Produzieren entstehen können. Zusammengefasst treten diese Fehler bei der Datengenerierung durch Unterschiede in der Genauigkeit, Dichte und Verteilung der Daten auf. (2) Prozess- und Interpolationsfehler: Je nach Interpolationsmethode können dabei unterschiedlich grosse Fehler entstehen. (3) Ausserdem besteht die Möglichkeit für grosse Unterschiede zwischen dem tatsächlichen Gelände und der Repräsentation durch das DHM. Dies wird allerdings eher als Unsicherheit betrachtet. Dazu wird auch die Wahl der Auflösung gezählt, zu welcher bereits einige Arbeiten verfasst wurden, auf welche Tate & Fisher (2006) verweisen.

Messfehler, Digitalisierungsfehler sowie Interpolationsfehler beeinflussen alle die Genauigkeit von DHM. Deswegen existieren mehrere Ansätze, um die vorhandene Genauigkeit abzuschätzen. Oft werden dafür Höhenwerte des DHMs mit „realen“ Höhenwerten von genaueren topographischen Daten verglichen, indem das quadratische Mittel (= RMSE: Root Mean Square Error) als Indikator für die Unterschiede verwendet wird. Fehler aus DHM pflanzen sich in der Berechnung von *land surface parameters* fort und zeigen so unerwartete Resultate auf. Dabei können relativ kleine Fehlerquellen bereits grössere Auswirkungen haben. Um solche Fehlerfortpflanzungen aufzuzeigen, wird die Monte-Carlo Simulation verwendet. Dabei werden Operationen mit leicht veränderten Input-Parametern mehrere Male durchgeführt, um so die Auswirkungen der verschiedenen Parameter erkennen zu können (Temme et al., 2008).

## 2.3 Pixel- versus Objektbasierter Ansatz

Um Klassifikationen vorzunehmen existieren einerseits pixel- und andererseits objektbasierte Ansätze. Beim pixelbasierten Ansatz wird jedes Pixel einzeln betrachtet, die Nachbarpixel spielen keine Rolle, während beim objektbasierten Ansatz die Nachbarschaft einbezogen wird. Die Ansätze sind in erster Linie aus der Fernerkundung bekannt. Früher war das zu untersuchende Objekt ungefähr gleich gross wie ein Pixel, heutzutage mit massiver Verbesserung der Auflösung von Satellitenbildern hat sich dies allerdings geändert. Nun setzt sich ein einzelnes Objekt wegen kleinerer Pixelgrösse, also besserer Auflösung, aus mehreren Einheiten zusammen. Dementsprechend mussten neue Methoden ermittelt werden, welche nicht mehr auf einzelne Pixel sondern auf ganze Objekte fokussieren (Blaschke, 2010).

Die sogenannte **Objektbasierte Bild-Analyse** („Object-based Image Analysis OBIA“) basiert auf der Aufteilung eines Bildes in verschiedene Segmente (= Segmentierung) (Blaschke, 2010). Nach Schiewe (2002) kann dies einerseits durch das Zusammenfügen von ähnlichen Elementen (Homogenität) als auch durch erkannte Unterschiede zu den Nachbarn (Heterogenität) passieren. Für eine solche Aufteilung des Bildes sind verschiedene Vorgehensweisen bekannt (Schiewe, 2002):

- a) Punkt-basiert
- b) Kanten-/Grenzen-basiert
- c) Regions-basiert
- d) Eine Mischform dieser drei Vorgehensweisen (Blaschke, 2010)

Die **punktbasierte** Vorgehensweise sucht nach homogenen Elementen innerhalb des ganzen Bildes durch das Setzen von globalen Schwellenwerten. Es werden gleiche oder ähnliche Pixelwerte derselben Gruppe zugefügt. Die Schwellenwerte können das Bild in zwei oder mehr Klassen teilen, wobei diese statistisch oder aufgrund des Histogramms ermittelt werden können. Da die Nachbarschaft der Pixel nicht einbezogen wird, folgt in einem zweiten Schritt eine Beziehungsanalyse: Räumlich verbundene Elemente mit demselben Wert werden dann einer Region zugeteilt (Schiewe, 2002). Unter **kantenbasiert** wird verstanden, dass die Intensität, Farbe oder Textur von Pixeln zwischen verschiedenen Klassen abrupt wechselt (Shih & Cheng, 2005). Die Segmentierung findet also aufgrund von Entdeckung dieser Kanten statt.

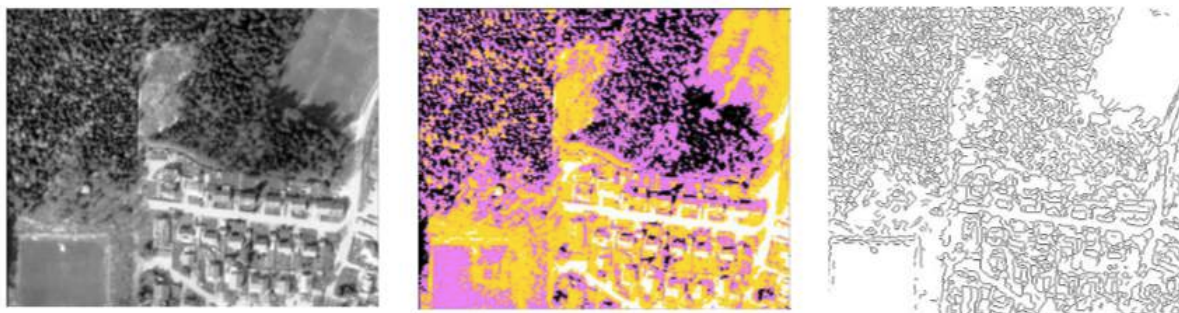


Abbildung 2.10: Ausgangsbild (links), Segmentierung durch punktbasierte Methode (Mitte) als auch durch kantenbasierte Methode (rechts) (Schiewe, 2002)

Der *regionsbasierte* Ansatz hingegen sucht nicht nach Veränderungen, sondern bildet Regionen, welche in sich relativ homogen sind. Diese Regionen starten bei vorher bestimmten Pixeln und werden immer grösser, solange die Pixel ähnliche Eigenschaften aufweisen, bis am Ende alle Pixel einer Region zugeteilt sind (Preetha et al., 2012). Bei den erhaltenen Segmenten handelt es sich um Regionen, welche in sich als homogen sowie gegen aussen als heterogen empfunden werden. Dadurch, dass viele Pixel zusammen in ein Segment gehören, weisen diese viel mehr Informationen auf als einzelne Pixel. Einerseits betrifft dies zusätzliche spektrale Informationen, andererseits werden auch räumliche Angaben zur Verfügung gestellt wie Distanzen, Nachbarschaft und Topologie. Die zusätzlichen räumlichen Informationen sind wohl einer der Hauptgründe für die starke Zunahme von objektbasierter Bildanalyse (Blaschke, 2010).

Neben der Verwendung solcher objektbasierter Methoden in der Fernerkundung werden diese auch im GIS-Bereich eingesetzt. Da spielen die spektralen Eigenschaften keine Rolle mehr, es werden Segmente oder Objekte aufgrund ähnlicher Informationen von zum Beispiel Neigung und Exposition der Pixel gebildet. So einen objektorientierten Ansatz zeigen van Asselen & Seijmonsbergen (2006), mit welchem verschiedene Landformen (Schwemmfächer, Rinnen, Schutthalden, fluviale Terrassen,..) klassiert werden sollen. In Abbildung 2.11 ist deren Vorgehen für eine Klassierung von Landformen zu erkennen. In einem ersten Schritt werden Trainingsgebiete mit Hilfe der geomorphologischen Karte erstellt. Ausserdem werden für diese Trainingsgebiete zonale Statistiken von Neigungswinkel und Höhenmeter errechnet. In einem nächsten Schritt findet eine Segmentation der Neigungskarte statt, welche schlussendlich zusammen mit der zonalen Statistik zur objektorientierten Klassierung führt. Zum Schluss wird die ermittelte Klassierung durch den Vergleich mit der bestehenden geomorphologischen Karte ausgewertet. Im Vergleich zu einzelnen Pixeln enthalten hier die erhaltenen Objekte viel mehr Informationen, welche weiterverwendet sowie statistisch ausgewertet werden können.

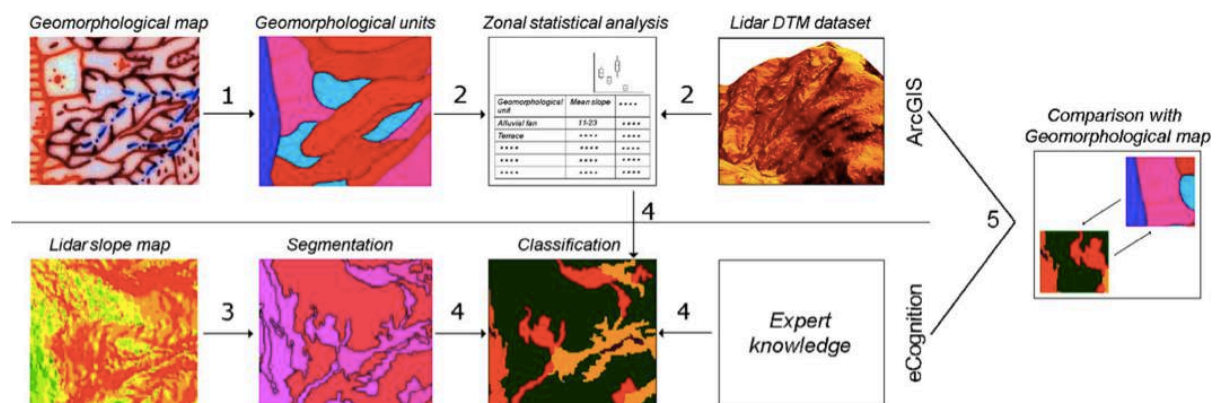


Abbildung 2.11: Objektorientierter Ansatz (van Asselen & Seijmonsbergen, 2006)

Bei dieser Methode werden kleinere Segmente immer zu grösseren zusammengeschlossen in Bezug auf ähnliche Nachbarschaften. Dies geschieht bis zu jenem Punkt, an dem eine bestimmte Heterogenität im Objekt vorhanden ist, welche den Fusions-Prozess beendet.

### 2.3.1 Region-Growing

Ein oft verwendeter objektorientierter Ansatz ist das sogenannte Region-Growing. Seine Grundlage wurde bei der Segmentierungs-Methode *regionsbasiert* bereits angeschnitten. Der Ansatz *Region-Growing* setzt sich aus zwei wichtigen Schritten zusammen:

Zuerst werden sogenannte *Seeds* (deutsch: Startwerte) definiert (Shih & Cheng, 2005). Diese Seedpixel weisen bestimmte Eigenschaften auf, welche eine Klasse gut repräsentieren und deshalb als Grundlage für eine Region festgelegt werden. Nach Adams & Bischof (1994) fällt die Entscheidung, was zu einer Region/Landform gehört, mit der Wahl der Seedpixel, diese müssen also gut gewählt werden. Anschliessend erfolgt die Untersuchung der Nachbarn auf Ähnlichkeit in Bezug auf die Seedpixel. Unterscheiden sich die Nachbarn nicht markant von den Seeds, werden sie zur Region (zu den Seedpixeln und den bereits vorher angegliederten Pixeln) hinzugefügt. „Ähnlich“ kann einerseits im Bereich der Fernerkundung als spektrale Ähnlichkeit betrachtet und in anderen Fällen, wie in dieser Arbeit hier, als ähnliche Topographie aufgefasst werden. Durch Iteration werden ständig neue Pixel hinzugefügt, bis ein gewisser Schwellenwert oder der Bildrand zum Stoppen führen (Preetha et al., 2012).

Region-Growing stellt also eine zonenbasierte Methode dar, welche durch Iteration ähnliche Elemente mithilfe eines „bottom-up“-Ansatzes zu grösseren Einheiten zusammenfasst. Dies führt zur Minimierung der Ungleichheit innerhalb der Regionen und zur Maximierung der Ungleichheit gegenüber anderen Regionen (Jellema et al., 2009). Mit topographischen Attributen wie Neigungsänderung oder Krümmung als Input, kann davon ausgegangen werden, dass morphologisch homogene Gebiete nach den Landformelementen von Dikau (1989) zusammengefasst werden (Romstad & Etzelmüller, 2012). So werden Objekte aufgrund ihrer gemeinsamen Eigenschaften und nicht aufgrund der trennenden Grenzen definiert.

Überzeugend an diesem Algorithmus ist die Möglichkeit der Handhabung von grossen Datensätzen (Duque et al., 2007). Region-Growing bezieht sich auf die menschliche Wahrnehmung im Sinne einiger Prinzipien der Gestalttheorie, sodass ähnliche sowie nahe beieinander liegende Objekte als zusammengehörend empfunden werden (Palmer, 1992). Oft wird dieser Algorithmus in der Landschaftsökologie verwendet, um aus Luftbildaufnahmen und/oder Satellitenbildern Habitate, Vegetation oder Landbedeckung zu kartieren (Jellema et al., 2009).

Wie schon oben erwähnt, muss ein Region-Growing-Ansatz nichts mit spektralen Eigenschaften der Pixel zu tun haben, verschiedene geomorphometrische Werte können die ausschlaggebenden Elemente sein. Am Geographischen Institut der Universität Zürich wurden kürzlich zwei Arbeiten verfasst, eine Doktor- und eine Masterarbeit, welche beide einen solchen Region-Growing-Ansatz beschreiben und verwenden. Die Doktorarbeit von Straumann (2010) versucht Täler anhand der Talböden zu extrahieren. Dafür muss der Begriff „Tal“ zuerst definiert werden. Ein Tal besitzt immer einen Talboden, welcher verglichen mit dem angrenzenden Gebiet bestimmt die tiefste absolute Höhe aufweist. Anschliessend orientiert sich dieser Ansatz an den Einzugsgebieten, denn das Gebiet, wo Wasser in einem Tal fliesst, kann mit dem vorher definierten Talboden gleichgesetzt werden.

Es folgt die Einteilung der Einzugsgebiete in Teilregionen, welche jeweils nur einen Arm des Baches aufweisen, also folglich nur ein einzelner Talboden vorhanden ist.

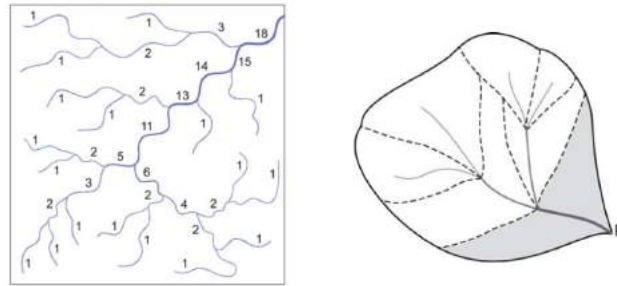


Abbildung 2.12: Flussnetzwerk (links) und nach Tälern unterteiltes Flussnetzwerk (rechts) (Straumann, 2010)

Diese tiefst gelegenen Zellen werden als Seedpixel festgelegt. Auf diesen Pixeln basiert der Region-Growing-Algorithmus. Es wird durch alle Pixel durchiteriert, wobei sich jede Zelle jeweils an der Nachbarszelle orientiert. Wurde eine der acht Nachbarszellen (in einer 3 \* 3-Matrix) bereits als zum Talboden gehörend klassiert, wird die zu untersuchende Zelle auf die Höhendifferenz zu jener Nachbarszelle getestet. Weist der Höhenunterschied eine minimale Differenz auf, wird die Zelle ebenfalls zum Talboden gezählt. Ist der Unterschied aber zu gross, gehört die Zelle nicht zur „wachsenden Region“.

Auch Schmid (2014) arbeitete in seiner Masterarbeit mit einem Region-Growing-Ansatz. Das Ziel dieses Ansatzes war die Extraktion von Murkegeln aus der Landschaft.

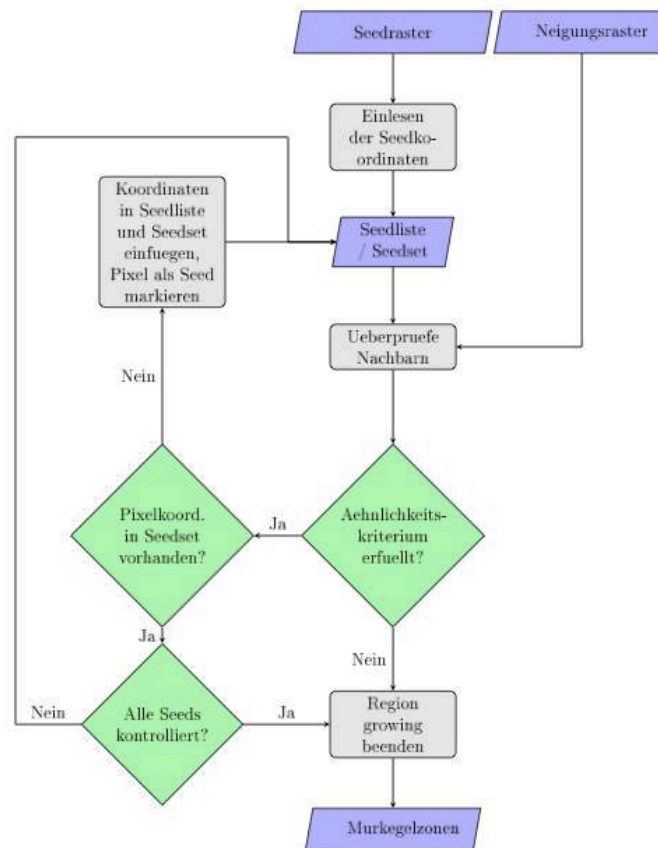


Abbildung 2.13: Flussdiagramm des Region-Growing-Algorithmus (Schmid, 2014)

Auch hier wurden zu Beginn Seed-Pixel definiert. Um diese zu bestimmen, wurden die Faktoren Neigung, Plankurvatur und Flussnetzwerk miteinander verschnitten. Diejenigen Pixel, welche bei allen Faktoren bestimmte Kriterien erfüllten, wurden als Seed-Pixel festgesetzt, alles rundherum wurde als „NoData“ definiert. Sein weiteres Vorgehen ist dem Flussdiagramm in Abbildung 2.13 zu entnehmen.

## 2.4 Forschungslücken

Die Eigenschaften von Lawinen, vor allem der Anrisszonen, wurden bereits in diversen Arbeiten erforscht. Bei einigen stehen die Geländeparameter im Mittelpunkt, andere konzentrieren sich auf die Beschaffenheit der Schneedecke, dritte entwickeln Modelle, um künftige Lawinen zu lokalisieren und Auslaufdistancen vorherzusagen. Selten betreffen diese Arbeiten aber Unfalllawinen, obwohl jene Lawinenart am meisten Todesopfer zur Folge hat. Des Weiteren befassen sich die Arbeiten ausschliesslich mit Anrisszonen und diskutieren die Geländeparameter in den Hängen rund um Anrisszonen nicht. Weshalb also Anrissgebiete inmitten des Hanges enden und nicht die gesamte Breite des Hanges beanspruchen, obwohl ähnliche Geländeeigenschaften herrschen, darüber wurde noch keine Forschung betrieben.

Region-Growing-Ansätze werden in verschiedensten Bereichen eingesetzt: Zur Segmentierung von Bildern (Shih & Cheng, 2005), zur Ermittlung von Einzugsgebieten (Romstad & Etzelmüller, 2012), zur Unterteilung in geomorphologische Landformen (Etzelmüller et al., 2007), zur Klassierung der Landschaft (Jellema et al., 2009), zur Ermittlung von Talboden (Straumann, 2010) als auch zur Klassierung von Murkegeln (Schmid, 2014). Wie zu erkennen ist, findet der Ansatz vor allem in der Geomorphologie Anwendung, sowohl zur Einteilung von ganzen Landschaften in Landformen wie auch zur Ermittlung von einzelnen Phänomenen. Das Interesse, Hänge zu erkennen und von anderen abzugrenzen, bestand bis heute offenbar nicht. Auch konnte kein Region-Growing-Ansatz gefunden werden, welcher im Bereich von Lawinen angewendet wurde.

In diese Forschungslücken fügt sich die hier verfasste Arbeit ein: Es soll ein in der Geomorphologie oft verwendeter Ansatz im Forschungsbereich von Lawinen angewendet werden, um Hänge zu extrahieren. Anhand dieser Resultate soll geklärt werden, ob Rückschlüsse alleine aufgrund von Geländeparametern auf mögliche Gründe für das Nicht-Einbeziehen der Hänge rund um Anrisszonen gefunden werden können.



## 3 Daten, Untersuchungsgebiet und Software

### 3.1 Datengrundlagen

In dieser Arbeit wurden Daten vom SLF verwendet, dazu auch durch Swisstopo generierte Informationen. Vom SLF dienten Fotos von Lawinen, digitalisierte Umrisszeichnungen von vergangenen Lawinen sowie die Schadenlawinendatenbank SLDB als Grundlage. Darauf aufbauend konnten die Daten aus der Arbeit von Vontobel (2011) weiterverwendet werden, welche ebenfalls auf Daten vom SLF basieren.

Die Digitalen Höhenmodelle sowie sonstige Karten zum Untersuchungsgebiet (PK 25, SWISSIMAGE) wurden vom Bundesamt für Landestopographie Swisstopo zur Verfügung gestellt.

In den folgenden Abschnitten erfolgt die genauere Beschreibung der verwendeten Daten.

#### **SLDB, Umrisszeichnungen & Fotos**

Im Jahr 1998 begann das SLF eine Datenbank zu führen, in welche sämtliche Lawinen mit Personen- und/oder Sachschäden eingetragen und so archiviert werden konnten. Dementsprechend liegt heute eine sehr umfassende Schadenlawinendatenbank vor (SLF, o.J.-a). Für jede eingetragene Lawine ist eine Lawinennummer, das Datum sowie der Ort vorhanden. Es existieren viele weitere Attribute, die allerdings nicht bei ganz allen Lawinen verfügbar sind: Anzahl erfasste Personen, Anzahl Todesopfer, Anzahl Verletzte, Lawinengefahrenstufe, gefährdete Exposition und Höhenlage laut Bulletin, tatsächliche Exposition des Anrisses, Höhe über Meer, Anrissmächtigkeit, Anrissbreite, Lawinenlänge, Auslöseart. Für die Jahre 1999/2000 bis 2013/14 konnten aus dieser SLDB viele Informationen entnommen und verwendet werden.

Zusätzlich wurden vom SLF mit Hilfe von Fotos und Berichten über die Lawinen bereits Lawinenumrisszeichnungen auf der LK25 digitalisiert, welche für diese Arbeit als weitere Grundlagen dienten. Es waren 243 digitalisierte Umrisszeichnungen für die noch zu digitalisierenden Anrisszonen aus den Jahren 2010/11 bis 13/14 vorhanden.

Ausserdem wurden Fotos zu niedergegangenen Lawinen vom SLF zur Verfügung gestellt. Für diesen Zeitraum waren Fotos von 317 Lawinen vorhanden. Schlussendlich konnten mit Hilfe der Umrisszeichnungen und Fotos 30 Anrisszonen für die Winter 2010/11 bis 13/14 digitalisiert werden.

Auf denselben Grundlagen aufbauend, hat auch Vontobel Anrisszonen für die Jahre 1999/2000 bis 2009/10 digitalisiert. Diese konnten übernommen werden, sodass insgesamt 172 digitalisierte Anrisszonen zur weiteren Bearbeitung bereit standen.

#### **Digitales Höhenmodell: swissALTI3D**

Beim Modell swissALTI3D handelt es sich um ein sehr präzises digitales Höhenmodell, welches die Schweiz ohne Bebauung und Bewuchs (also ein Digitales Geländemodell) darstellt. Dieses wird alle sechs Jahre aktualisiert. Es handelt sich um Daten im Rasterformat mit Zellengrößen von 2 m, 5 m oder 10 m (Swisstopo, 2014).

Vor Einführung des swissALTI3D stand seit dem Jahr 1999 das DHM25 zur Verfügung. Dieses wurde von digitalisierten Höhenlinien aus den Landeskarten mit Auflösung 1:25'000 abgeleitet und existierte nur mit einer Zellengröße von 25 m. Nachgeführt wurde dieses nie, deshalb wurde mit dem swissALTI3D auf ein neues Modell gesetzt, welches sowohl in besserer Auflösung als auch

nachführbar angeboten wird. Für Daten unterhalb von 2000 m wurde die Oberfläche mit einem Laserscanner vermessen. Diese Daten weisen eine Genauigkeit von  $\pm 50$  cm auf. Oberhalb von 2000 m existieren keine solchen Laserdaten. Daten für den Voralpen- und Alpenraum wurden mit Hilfe der Stereokorrelation generiert. Dabei werden durch überlappende Luftbildpaare automatisch Höhenwerte berechnet. Diese Resultate zeigen Genauigkeiten von  $\pm 1$  m bis 3 m auf. Zusammengefügt ergibt dies das heutzutage verwendete Höhenmodell swissALTI3D (Swisstopo, 2014).

### **Digitales Oberflächenmodell: DOM**

Über die ganze Schweiz hinweg bis auf eine Höhenlage von 2000 m existiert ein hochpräzises, naturbasiertes, digitalisiertes Oberflächenmodell (DOM). Die Daten für dieses Modell wurden mit Hilfe von Airborne-Laser-Scanning gesammelt. Es stehen zwei Varianten zur Verfügung: (1) Das DOM ROH, welches aus einer Wolke von Vektorpunkten mit x-, y- und z-Koordinaten besteht, sowie (2) das DOM GRID 2 m, welches ein aus den DOM-ROH-Vektorpunkten interpoliertes Rastergitter darstellt. Die Rasterstruktur weist auch hier eine Auflösung von 2 m auf, unterscheidet sich vom swissALTI3D aber darin, dass auch Bebauung sowie Vegetation bis in die Höhe von 2000 m abgebildet wird (Swisstopo, 2005). Wie beim swissALTI3D wurden die Laserdaten bis zu 2000 m hin verwendet, darüber wurde das Rastergitter durch das DHM25 ergänzt (Swisstopo, o.J.). Im offenen Gebiet beträgt die Höhengenaugigkeit  $\pm 50$  cm, im Bereich von Gebäuden und Wäldern sind es  $\pm 1.5$  m (Swisstopo, 2005).

### **Topographische Karte: PK25**

Die Pixelkarte, auch Swiss Map Raster genannt, in der Auflösung 1:25'000 vom Bundesamt für Landestopographie umfasst die digitalen Landeskarten in Rasterform. Die Daten sind georeferenziert und werden den digital hergestellten Kartengrundlagen entnommen. In dieser Arbeit wurde die Pixelkarte einerseits zur Digitalisierung der Anrisszonen als auch zur Illustrierung verwendet (Swisstopo, 2015).

### **Übersichtskarte Kantone**

Zur Darstellung des Untersuchungsgebietes wurde eine Übersichtskarte zu den Kantonen von Swisstopo verwendet. Sie stammt aus dem Jahr 2007.

### **SWISSIMAGE**

Zur Visualisierung einiger Resultate wurde SWISSIMAGE von Swisstopo verwendet. Es handelt sich dabei um ein Orthophotomosaik, welches aus digitalen Farbluftbildern zusammengesetzt wurde. Durch die Korrektur der Neigungseinflüsse der Kamera und des Geländes, was laut Definition ein Orthophoto von einem Luftbild unterscheidet, ist ein einheitlicher Massstab sowie eine einheitliche Radiometrie über der gesamten Schweiz zu finden. Auflösungen werden von 25 cm bis 250 cm zur Verfügung gestellt. Seit 2008 herrscht ein Nachführungszyklus von drei Jahren, jedes Jahr wird wieder ein Teil erneuert. Deshalb entsteht ein Produkt über drei Jahre hinweg. Für diese Arbeit wurde SWISSIMAGE aus den Jahren 2009/10/11 verwendet (Swisstopo, 2010).

### 3.2 Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet war ursprünglich dasselbe wie bei Vontobel (2011) vorgesehen. Sie untersuchte zwei Gebiete im Wallis und ein Gebiet rund um Davos im Kanton Graubünden. Da in der hier vorliegenden Arbeit lediglich die Anrisszonen und nicht die Umrisse behandelt wurden, war die Zahl der vorhandenen Anrisse in Vontobels Gebieten zu gering. Deshalb wurde das Untersuchungsgebiet für diese Arbeit auf die gesamten Schweizer Alpen ausgeweitet. Es war abzusehen, dass riesige Datenmengen gehandhabt werden müssen, deshalb wurde der Bereich der Alpen in neun kleinere Zonen unterteilt, wie der Abbildung 3.1 unten zu entnehmen ist.

Untersucht wurde mit einer 10 m-Auflösung.

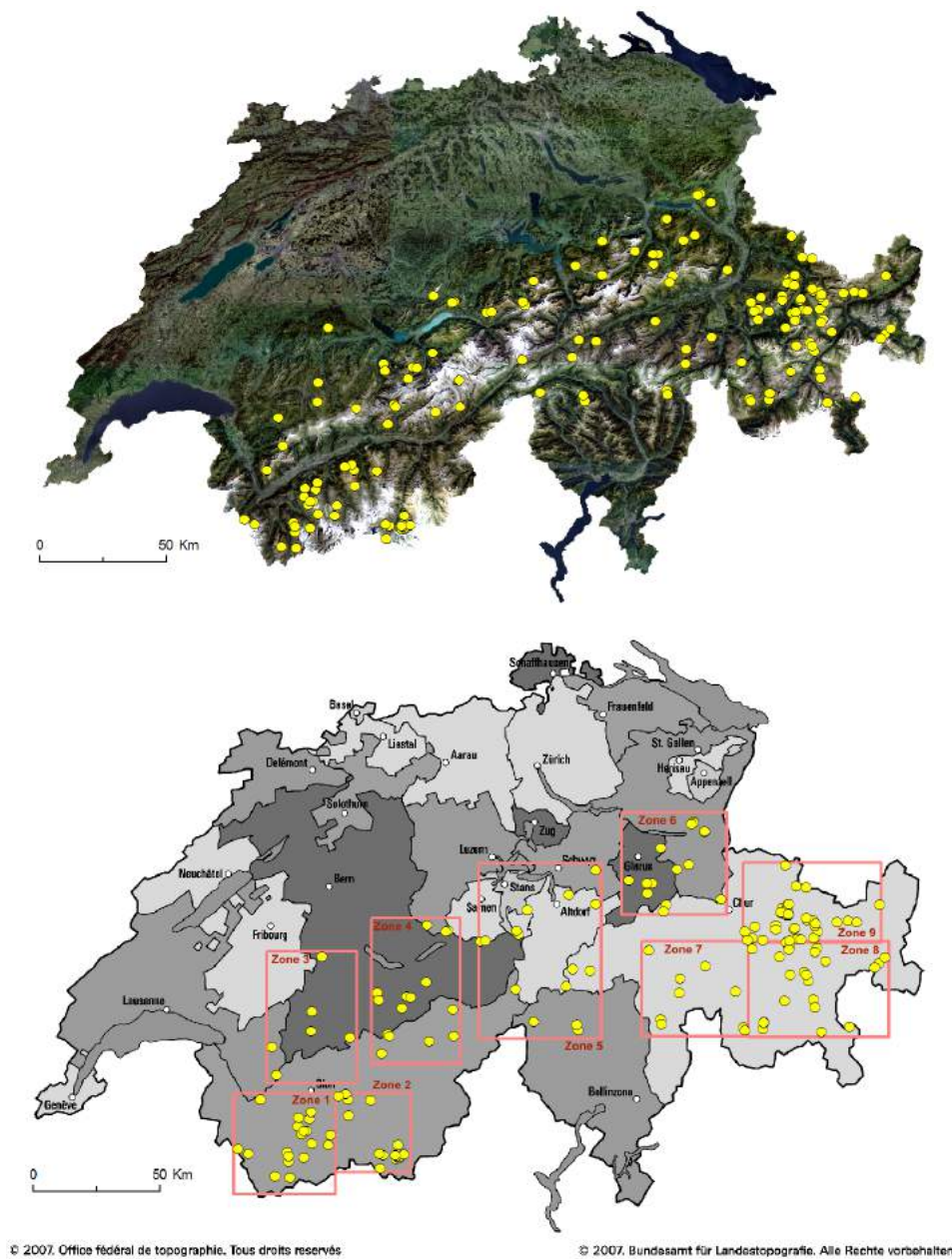


Abbildung 3.1: Untersuchte Lawinen auf dem SWISSIMAGE (oben) und auf die Kantone verteilt inklusive Zoneneinteilung

Verwendete Daten: SWISSIMAGE und Übersichtskarte Kantone von Swisstopo

Der folgenden Tabelle sind genauere Informationen über die einzelnen Zonen zu entnehmen.

Zone	Verortung	Grösse	Anzahl Lawinen
1	Unterwallis	1600 km <sup>2</sup> (40.0 km * 40.0 km)	20
2	Mattertal/Val d'Anniviers	925.37 km <sup>2</sup> (29.87 km * 30.98 km)	15
3	Berner Oberland/Waadt	1843.26 km <sup>2</sup> (35.42 km * 52.04 km)	6
4	Berner Oberland/Oberwallis	1998.25 km <sup>2</sup> (34.71 km * 57.57 km)	15
5	Innerschweiz	3315.45 km <sup>2</sup> (48.05 km * 69.0 km)	16
6	Glarus/St. Gallen	1666.53 km <sup>2</sup> (41.58 km * 40.08 km)	15
7	Surselva/Viamala	1564.64 km <sup>2</sup> (41.88 km * 37.36 km)	10
8	Engadin/Mittelbünden	2097.19 km <sup>2</sup> (55.54 km * 37.76 km)	26
9	Davos/Prättigau	1716.81 km <sup>2</sup> (54.45 km * 31.53 km)	49

Tabelle 3.1: Infos zu den Zonen des Untersuchungsgebiets

Insgesamt ergibt dies auf diese neun Zonen aufgeteilt 172 Polygone als Anrisszonen. 7 Lawinen sind allerdings speziell, da diese aus zwei oder sogar drei Polygonen als Anrisszonen bestehen (6 \* zwei Polygone, 1 \* drei Polygone, ergibt insgesamt 15 Polygone). Diese wurden unterteilt betrachtet, da sie zum Teil bei völlig unterschiedlichen Expositionen stattgefunden haben und dadurch die Eigenschaften der Anrisszonen völlig verfälscht hätten. 157 Lawinen weisen dementsprechend nur ein einziges Polygon als Anriss auf.

Von den 164 verwendeten Lawinen sind laut SLDB nur 7 natürlich ausgelöst worden. Bei diesen waren keine Personen involviert, allerdings wurde anderer Schaden angerichtet. Bei 11 Anrisszonen ist die Auslöseart unsicher, alle anderen Lawinen wurden vom Menschen selber ausgelöst (Skifahrer, Pistenfahrzeug,..). Die Verteilung der Anrisszonen über die Jahre sowie deren Auslöseart ist folgender Abbildung zu entnehmen.

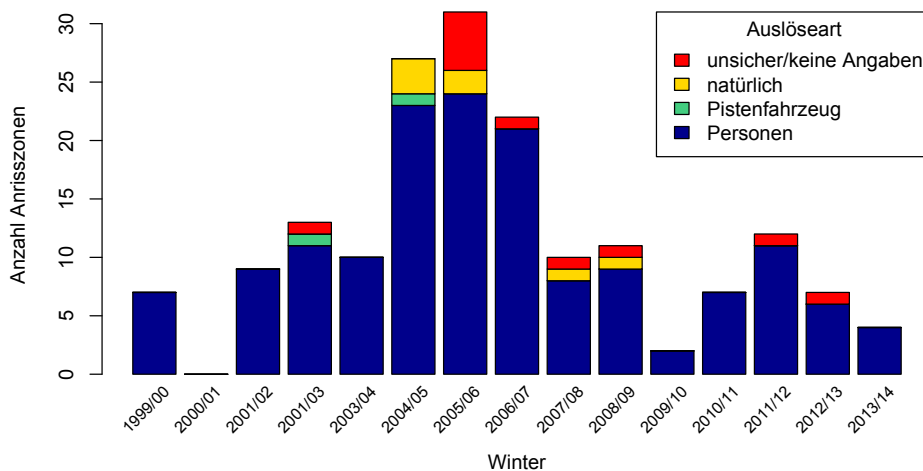


Abbildung 3.2: Schadenlawinen nach Auslöseart und Winter (N = 172)

Bei Personen, welche Lawinen auslösen, kann es sich um Ski-/Snowboardfahrer, Bergsteiger oder Schneeschuhläufer handeln.

### 3.3 Software

**ArcGIS:**

Für die Digitalisierung und anschließende Verwaltung der Anrisszonen-Daten wurde das Programm ArcGIS, insbesondere ArcMap (Version 10.2.2) von Esri verwendet. Weitere eingesetzte Funktionen waren die Werkzeuge des „Spatial Analysts“, um die Eigenschaften der Lawinen zu ermitteln. Ausserdem wurde ArcMap zur Visualisierung der Resultate benutzt.

**Eclipse:**

Zur Generierung des Algorithmus wurde die Version Luna (4.4.2) des Programms Eclipse eingesetzt. Eclipse stellt eine integrierte Entwicklungsumgebung dar (IDE), welche als Open Source Software von der Eclipse Foundation zur Verfügung gestellt wird (Eclipse, o.J.).

**R:**

Für das Auswerten (deskriptive Statistik) der Anrisszonen und der erhaltenen Hänge wurde die Open Source Software R beigezogen. Für das Copyright und die Weiterentwicklung von R verantwortlich ist die R Foundation (R-Project, o.J.).

**SPSS:**

Für statistische Analysen wie Korrelations- und Regressionsanalysen wurde das Statistik-Programm SPSS der Firma IBM beigezogen. (Version: SPSS Statistics 21).

## 4 Methodik

Die Idee dieser Arbeit besteht darin, den dazugehörigen Hang zu jeder Anrisszone zu finden. Dafür muss selbstverständlich eine Anrisszone vorhanden sein, deshalb muss diese zuerst ermittelt werden. Mit dieser als Voraussetzung können in einem ersten Schritt Hänge von Hand ausfindig gemacht werden, in einem zweiten Schritt werden diese mit Hilfe eines Algorithmus erkannt.

In diesem Kapitel wird die Vorbereitung der Daten für den Region-Growing-Ansatz und anschliessend dieser selbst thematisiert. Ausserdem wird das Vorgehen für die deskriptive Auswertung der Resultate, die Evaluation der erhaltenen Hänge und zum Schluss die Ermittlung von möglichen Zusammenhängen mit der SLDB aufgezeigt.

### 4.1 Digitalisieren der Anrisszonen

Als Datengrundlage für die Digitalisierung der Lawinenanrisszonen dienten Unterlagen des WSL-Instituts für Schnee- und Lawinenforschung SLF in Davos. Es wurden Fotos verwendet, welche die Lawinen mit Anrisszonen kurz nach dem Niedergang aufzeigen. Für die Jahre 1999/2000 bis 2009/10 wurden die Anrisszonen bereits durch Vontobel (2011) digitalisiert, diese konnten übernommen werden. Für die Ereignisse aus den Wintern 2010/11 bis 2013/14 wurden die Anrisszonen auf dieselbe Weise digitalisiert. Dabei ist allerdings zu beachten, dass längst nicht alle Fotos verwendet werden konnten, da jene je nach Perspektive, Wetterlage oder Schattenwurf unterschiedlich gut zu gebrauchen waren. Aus den Jahren 1999/00 bis 2013/14 standen am Ende insgesamt 172 digitalisierte Anrisse zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung.

#### 4.1.1 Vorgehensweise

Zur Digitalisierung der Anrisszonen dienten einerseits Fotos des SLF sowie die Schadenlawinendatenbank SLDB, welche viele Informationen über vergangene Lawinen enthält. Ausserdem existieren bereits digitalisierte Umriss der Lawinen durch das SLF, welche zusätzlich beigezogen werden konnten. Des Weiteren wurde die Schweizer Landeskarte PK 25 sowie die Schummerung (= Hillshade) des Höhenmodells swissALTI3D verwendet. Auf den Fotos sind die ungefähren Verläufe der Anrisszonen zu erkennen. Mit Hilfe der SLDB, welche unter anderem Länge, Breite und höchste Koordinate beinhaltet, konnten Anrisszonen auf der Karte lokalisiert werden. Aufgrund von Felsen in der Karte und erkennbaren Erhebungen und Vertiefungen im Höhenmodell wurden die Anrisszonen so mit einer gewissen Unsicherheit in ArcMap gezeichnet.

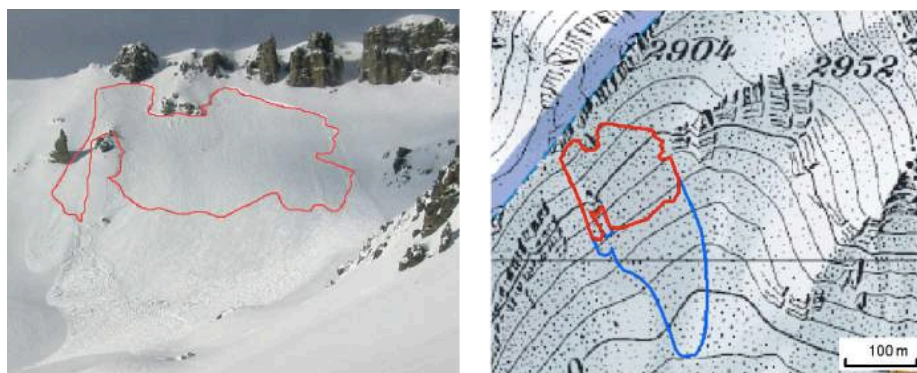
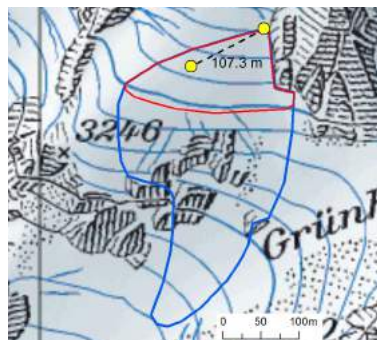


Abbildung 4.1: Digitalisieren der Anrisszonen (Vontobel, 2011)

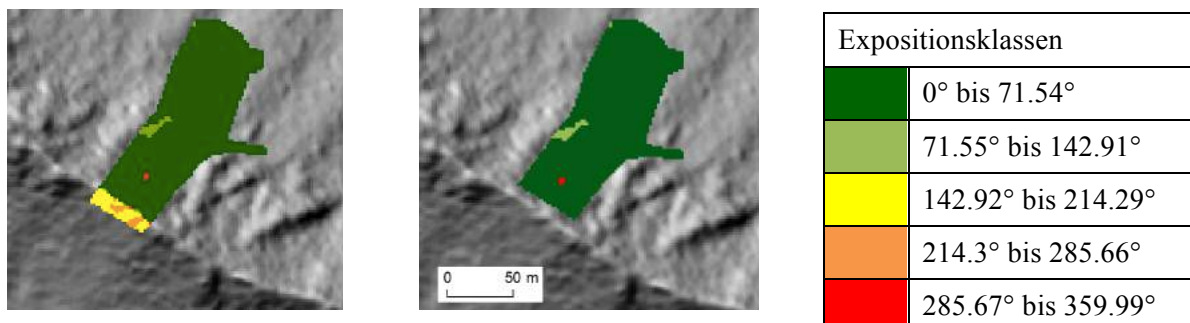
### 4.1.2 Probleme

Beim Herauspicken der zu gebrauchenden Fotos der Anrisszonen war Vorsicht geboten, da fälschlicherweise in der Kategorie „Schneebrett“ zum Teil Gleitschneelawinen auftauchten. Diese weisen allerdings einen völlig anderen Prozess auf als Schneebrettlawinen, wie im Kapitel „Lawinenbildung und Lawinenarten“ von Harvey, Rhyner, et al. (2012) nachzulesen ist. Sie wurden dementsprechend bei der Digitalisierung ausser Acht gelassen. Des Weiteren sind in der Schadenlawinendatenbank des SLF jeweils Koordinaten des höchsten Punktes der Anrisszone aufgelistet. Werden diese allerdings mit den bereits vom SLF digitalisierten Lawinenumrissen verglichen, stimmen diese Punkte oft nicht überein (Differenzen bis zu 172 m). Es wurde von Fall zu Fall entschieden, ob nun der Koordinate oder der Digitalisierung vertraut werden sollte. Dazu dienten erneut die Fotos als Hilfe, auf welchen zu erkennen war, wo exakt die Lawine niederging. Auch hier dienten die Felsen zur Orientierung, zum Beispiel trug der Abstand zu ihnen zur genauen Lokalisierung der Anrisszonen bei. Schlussendlich wurde in allen Fällen aufgrund solcher Überprüfungen auf die Digitalisierung gesetzt. In Abbildung 4.2 ist so eine Differenz zwischen dem höchsten Punkt des digitalisierten Umrisses und dem höchsten genannten Punkt aus der SLDB zu erkennen. In diesem Fall beträgt sie 107.3 m.



**Abbildung 4.2: Differenz zwischen höchstem Punkt des digitalisierten Umrisses und höchstem Punkt laut SLDB**  
Verwendete Daten: Pixelkarte 1:25'000 von Swisstopo

Auch andere Fehler wurden später bei der Auswertung bemerkt. Ein kleiner Fehler in der Digitalisierung kann zu grossen statistischen Verfälschungen führen, wie z.B. in Abbildung 4.3:

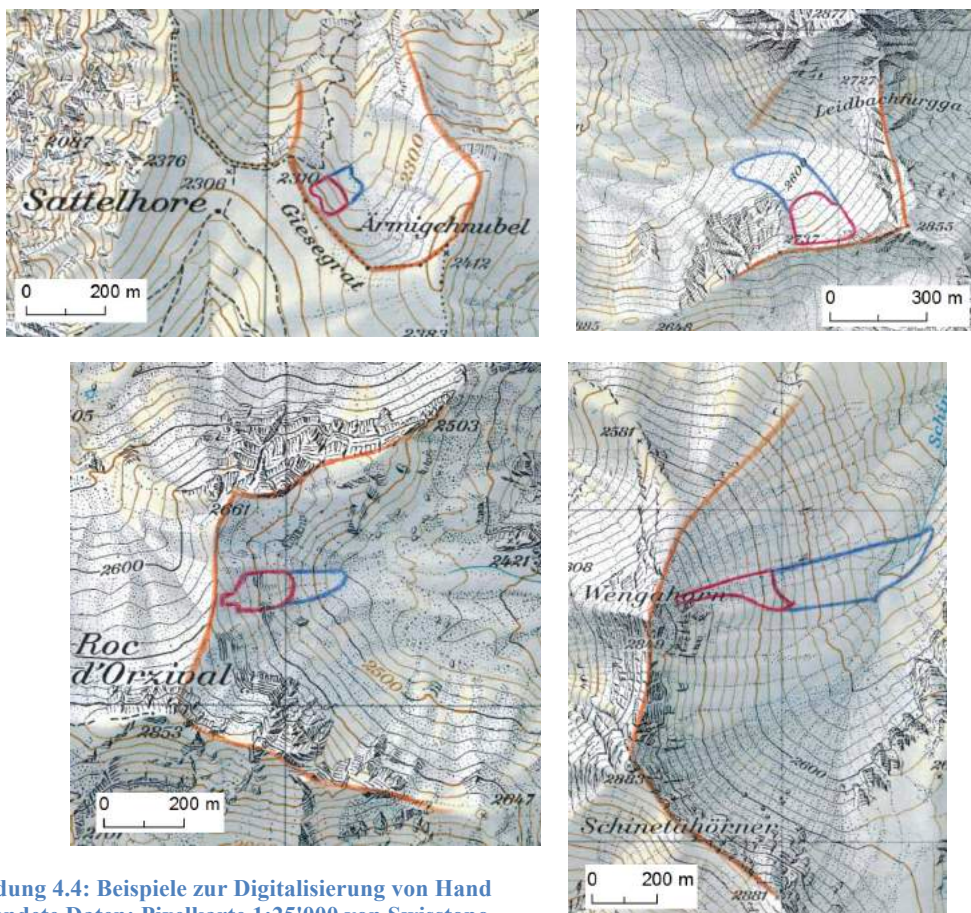
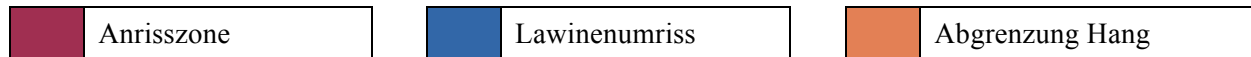


**Abbildung 4.3: Digitalisierungsfehler (links) und verbesserte Version (rechts)**  
Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Diese Anrisszone weist eine Exposition in Richtung Nord-Nordost auf, was durch die SLDB auch bestätigt wird. Allerdings fällt bei der Evaluation auf, dass auch Werte Richtung Süden auftauchen. Dies ist auf einen früheren Digitalisierungsfehler zurückzuführen, da die Anrisszone über den Kamm hinweg digitalisiert wurde. Für den Algorithmus wurde die verbesserte Version übernommen.

## 4.2 Hangerkennung von Hand

Ziel dieser Arbeit war es, eine Methode zu entwickeln, welche Hänge extrahiert. Dafür stellte sich zuerst einmal die Frage nach der Definition eines Hanges. Wo beginnt ein Hang und wo endet er? Um dieser Frage nachzugehen, wurden in einem ersten Schritt Kartenausschnitte mit Lawinanrisszonen angeschaut und von Hand mögliche Hänge eingezeichnet. Dabei wurde auf die Höhenlinien geachtet, durch welche Kämme und Erhebungen erkannt werden können, welche für das Eingrenzen von potentiellen Hängen als ausschlaggebend betrachtet wurden. Folglich orientieren sich die ermittelten Hänge an vorhandenen Geländeformen. In Abbildung 4.4 sind vier solche Beispiele zu finden.



**Abbildung 4.4: Beispiele zur Digitalisierung von Hand**  
 Verwendete Daten: Pixelkarte 1:25'000 von Swisstopo

Auf diesen Bildern ist klar zu erkennen, dass völlig unterschiedliche Anrissformen existieren. Da die Abgrenzung der einzelnen Hänge von Hand nicht leicht fiel, sollte als nächster Schritt ein Algorithmus entwickelt werden, welcher das Gelände nach mehreren Parametern objektiv untersucht und nicht nur in Bezug auf Höhenlinien. Das Ermitteln dieser „Hänge“ von Hand diente als wichtiger Schritt um Folgendes zu erkennen:

Wird der Hang um eine Anrisszone gesucht, ist dieser nicht einfach der Karte aufgrund von Abgrenzungen durch Kämme zu entnehmen. Als Hang wird die mögliche Fläche rund um eine Anrisszone verstanden, welche sich in den Geländeeigenschaften kaum von der Anrisszone unterscheidet. Folglich muss der Hang auf die Ähnlichkeit der Parameter zur Anrisszone hin untersucht werden.



## 4.3 Wahl und Vorbereitung der Daten für den Region-Growing-Algorithmus

In den folgenden Kapiteln werden zuerst mögliche Parameter, welche in den Region-Growing-Ansatz eingebunden werden könnten, thematisiert und deren Berechnung aufgezeigt. Anschliessend folgt die begründete Wahl der im Region-Growing-Ansatz verwendeten Parameter sowie deren Schwellenwertsetzung für den Algorithmus. Diese Reihenfolge und die jeweilige Kapitelnummer sind der Abbildung 4.5 zu entnehmen. Anschliessend an diese Kapitel erfolgt die genauere Erläuterung der Implementierung des Region-Growing-Algorithmus (siehe Kapitel 4.4).



Abbildung 4.5: Reihenfolge der Vorbereitung für den Region-Growing-Algorithmus

### 4.3.1 Mögliche Parameter für den Region-Growing-Algorithmus

In diesem Kapitel werden die möglichen Parameter für den Region-Growing-Ansatz genannt. In Tabelle 4.1 sind diese möglichen Parameter aufgelistet sowie deren Einfluss auf die Ausbreitung der Regionen aufgezeigt.

Parameter	Einfluss auf das Wachsen der Regionen (= Hänge)
Neigung	Für mögliche Anrisszonen spielen sowohl die absolute Neigung als auch die Neigungsänderung im Gelände eine Rolle.
- Absolut	Lawinen treten an Hängen mit einer Neigung von 30° bis 60° auf (Maggioni & Gruber, 2003).
- Relativ	Zu grosse Neigungsänderung deutet auf Kämmen, Senken und Erhebungen hin.
Exposition	Sowohl die Expositionsänderung im Gelände als auch die Festsetzung möglicher Spannbreiten der Exposition pro Anrisszone sind von grosser Wichtigkeit.
- Relativ	Zu grosse Expositionsänderung deutet auf Kämmen oder Kerbtäler hin.
- Spannweite	Dieser Parameter soll das unendliche Wachsen von Hängen verhindern.
Kurvatur	Durch das Festlegen einer erlaubten Spannweite sollten die Hänge vor grossen Änderungen der Krümmungswerte und somit vor Änderungen der Geländeform bewahrt werden.
Rauigkeit	Raues Gelände nahe an Kämmen (grosse Felsblöcke) verhindert grosse Schneeansammlungen und gilt daher weniger als mögliches Anrissgebiet (Ancy, 2001).
Wald	Vorhandener Wald verhindert ebenfalls Schneeansammlungen, Wald fällt als potentielles Anrissgebiet weg (Ancy, 2001).

Tabelle 4.1: Mögliche Parameter für die Hang-Extraktion

Um diese verschiedenen Parameter im Region-Growing-Ansatz anzuwenden, müssen zuerst die entsprechenden Daten zur untersuchten Region generiert werden. In den folgenden Absätzen wird

aufgezeigt, wie die verschiedenen Daten ermittelt werden, sodass anschliessend die oben genannten Parameter angewendet werden können.

### Neigung

Die Berechnung der Neigung jeder Zelle erfolgte mit dem Tool „Neigung“ aus dem Programm ArcMap. Es wird für jede Zelle die maximale Änderungsrate im Vergleich zu den benachbarten Zellen anhand eines Digitalen Höhenmodells berechnet. Als Ausgabeformat der Resultate kann Prozent oder Grad gewählt werden, wobei in dieser Arbeit letzteres verwendet wurde (Esri, 2012a).

### Exposition

Wie die Neigung wurde auch die Exposition in ArcMap berechnet. Sie ist unter dem Namen „Ausrichtung“ zu finden. Dieses Werkzeug ermittelt die Neigungsrichtung der maximalen Änderungsrate einer Zelle im Vergleich zu ihren Nachbarn, wobei auch hier ein Digitales Höhenmodell als Input dient. Die erhaltenen Werte variieren von 0 bis 360 (Esri, 2012b).

### Kurvatur

Die Krümmung setzt sich aus zwei verschiedenen Komponenten zusammen: Profil- sowie Plankrümmung. Mit der Funktion „Krümmung“ in ArcMap können Profil- und Plankrümmung ganz einfach ermittelt werden. Dabei wird der zweite abgeleitete Wert der Eingabe-Oberfläche auf Zellenbasis berechnet (Esri, 2012c).

### Rauigkeit

Zur Berechnung der Rauigkeit wurde der Ansatz von Cavalli & Marchi (2008) verwendet, welcher ebenfalls in die Masterarbeit von Schmid (2014) integriert wurde. Definiert wird dieser Rauigkeitsindex als Standardabweichung der sogenannten residuellen Topographie. In Abbildung 4.6 ist der Ablauf zur Berechnung dieser Rauigkeitswerte ersichtlich.

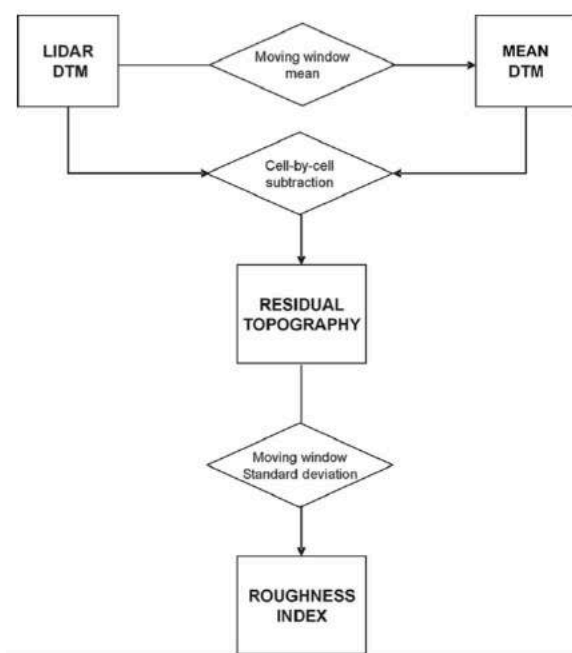


Abbildung 4.6: Vorgehen Rauigkeitsberechnung nach Cavalli & Marchi (2008)

Mit Hilfe eines gleitenden Fensters, welches aus 5 \* 5 Zellen besteht, wird das DTM geglättet und anschliessend die Differenz zum Ausgangs-DTM berechnet. Dies wird die *Residuelle Topographie* genannt. Anschliessend erfolgt eine erneute Glättung durch das 5 \* 5-Fenster, dieses Mal wird als Input die residuelle Topographie verwendet. Mit diesem Output wiederum wird die Differenz zur ursprünglichen residuellen Topographie berechnet. Von dieser Differenz wird zum Schluss die Standardabweichung ermittelt, was eine masslose Grösse ergibt, welche die Variation der Topographie aufzeigt. Je höher der Wert, desto rauer ist die Umgebung.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (x_i - x_m)^2}{25}}$$

**Formel 4.1: Berechnung der Rauigkeit (Cavalli & Marchi, 2008)**

Der Rauigkeitsindex wird berechnet wie in Formel 4.1 ersichtlich, wobei  $\sigma$  den Rauigkeitsindex selbst – was der Standardabweichung der residuellen Topographie entspricht – darstellt, während 25 die Anzahl der Zellen im verwendeten 5 \* 5-Fenster wiedergibt.  $x_i$  stellt den Wert der untersuchten Zelle dar,  $x_m$  ist der Mittelwert aller 25 Werte. Nach dieser Rechnung, welche in Python durchgeführt wurde, waren Rauigkeitswerte in Rasterform für den ganzen Alpenraum vorhanden. Allerdings wurde die Rauigkeitsberechnung nicht wie oben erklärt mit dem DTM sondern mit dem DOM durchgeführt. Erklärungen dazu folgen auf der nächsten Seite unter „Wald“.

Für die Interpretation der Resultate ist allerdings zu bedenken, dass das DOM oberhalb von 2000 m mit dem DHM25 ergänzt wurde, folglich in diesen Gebieten keine Vegetation und Bebauung aufweist. In der Schweiz liegen die höchstgelegenen Wald-Probeflächen in einer Höhe von 2289 m (Dobbertin, 2013a). Vereinzelt Bäume sind bis in grössere Höhenlagen anzutreffen, oberhalb von Saas-Fee (VS) hält eine Arve den Rekord auf 2585 m.

Um zu untersuchen, wie viele Anrisse davon betroffen sind, wird deren Anzahl je nach Höhenstufe in Tabelle 4.2 aufgezeigt (Verwendung des Mittelwertes der Höhe):

Höhenklassen	Anzahl Anrisszonen
1644.6 m bis 1999.9 m	13
2000.0 m bis 2289.9 m	29
2290.0 m bis 2585.9 m	58
2586.0 m bis 3323.1 m	72

**Tabelle 4.2: Verteilung der Anrisszonen nach ihrer absoluten Höhe**

Als Grenze wurde die 2000 m-Marke festgesetzt, da diese laut Swisstopo (o.J.) als Übergang von Laserscanning-Daten zum DHM25 gilt. Der zweite Grenzwert ist die oben genannte Waldgrenze, der dritte Wert stellt die Grenze von Einzelbäumen zu vegetationslos dar.

Für die 13 Anrisszonen unterhalb von 2000 m wird folglich der Wald aus dem DOM korrekt extrahiert. 29 Anrisse liegen über 2000 m, wo im DOM der Wald nicht mehr zu erkennen ist, laut WSL (Dobbertin, 2013a) die Waldgrenze aber darüber liegt. Diese sind also problematisch, da der Wald als potentielles Gebiet nicht automatisch ausgeschlossen wird. Allerdings ist die Waldgrenze natürlich nicht überall auf derselben Höhe zu finden, denn sie hängt von Temperatur, Niederschlag

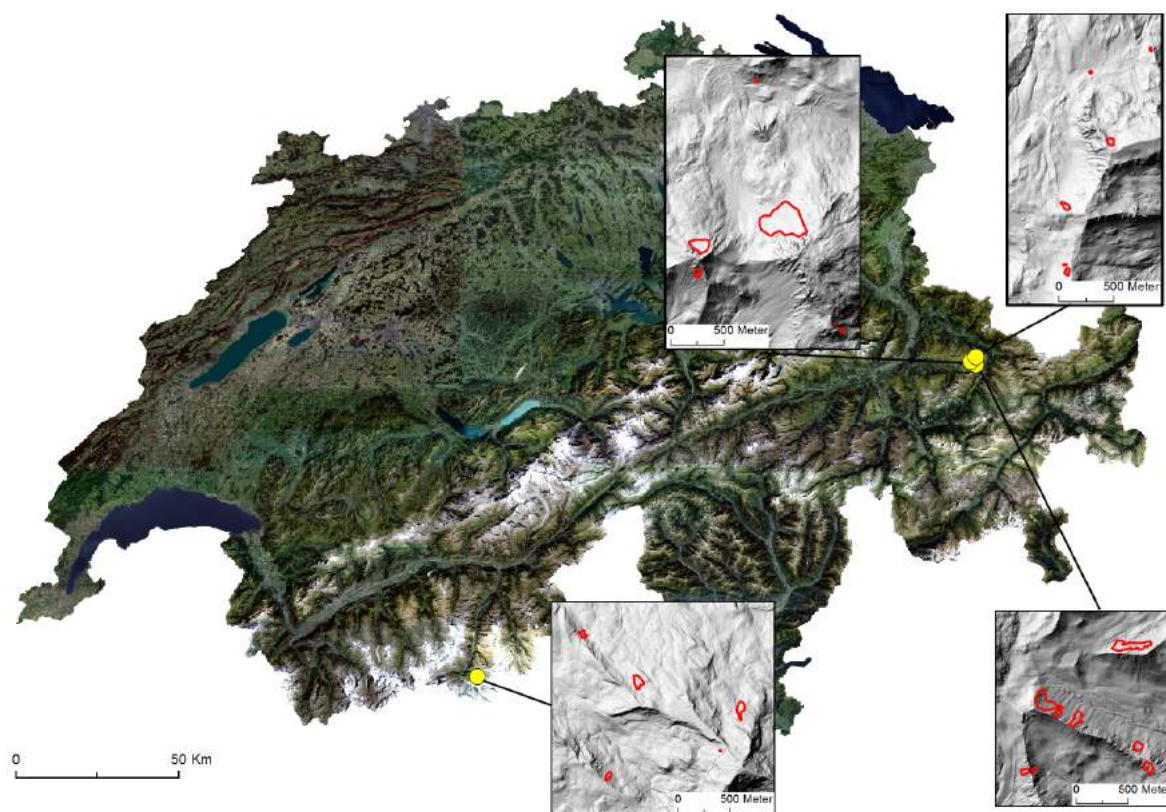
(bereits kleinräumige Variationen zwischen Berg und Tal), der Hangausrichtung und der Beschaffenheit des Geländes ab (Dobbertin, 2013b). Deshalb ist nicht klar, ob bei diesen Lawinen Wald auftreten würde, im DOM aber nicht gezeigt wird. 58 Anrisse liegen zwischen der Schweizer Waldgrenze und jener einzelner Bäume (dem „Arven-Rekord“). Da es sich dabei nur noch um vereinzelte Bäume handelt, ist es nicht weiter schlimm, dass jene im DOM nicht enthalten sind. Wie in der letzten Klasse zu sehen ist, tritt fast die Hälfte aller Anrisse oberhalb aller Bäume auf und ist von der DOM-Problematik nicht betroffen.

### Wald

Eine Möglichkeit, um Waldflächen zu erkennen und auszuschliessen, stellt Vector25 dar, eine andere zeigt Maggioni (2004), indem sie die ermittelte Waldmaske in Rasterform vom DHM subtrahiert. Eine weitere Variante ist das Ausschliessen des Waldes durch die oben genannte Rauigkeit, da Wald als rau und uneben gilt und daher ebenfalls durch den Parameter Rauigkeit gesteuert werden kann, sofern dieser mit dem DOM berechnet wurde. Da mit der Rauigkeit alleine folglich zu raue Stellen im Gebirge wie auch Wald ausgeschlossen werden können, ist der Einbezug von Vector25-Daten dementsprechend überflüssig. Beide unmöglichen Gebiete können in einem einzigen Schritt ausgeklammert werden.

### 4.3.2 Auswahl der Parameter für den Region-Growing-Ansatz

Zur Auswahl für den Region-Growing-Ansatz standen nun die im Kapitel 4.3.1 aufgezeigten Parameter. Für diese musste entschieden werden, wie sie die Begrenzung eines Hanges definieren können. Dafür wurden sogenannte Testlawinen genauer untersucht. Davon existieren 24, aufgeteilt auf vier Gebiete, eines davon liegt bei Zermatt, die anderen drei liegen bei Davos.



**Abbildung 4.7: Verortung der Testlawinen**  
Verwendete Daten: SWISSIMAGE und swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

In diesen Gebieten wurden Neigung, Exposition, Krümmung sowie Rauigkeit anhand der vorhandenen Anrisszonen untersucht und aufgrund der Werte entschieden, welche Parameter in den Region-Growing-Ansatz einfließen sollten und welche nicht. Anschliessend wurden aufgrund dieser Stichproben die Schwellenwerte für die gesamten Schweizer Alpen festgesetzt.

Als Parameter für den Region-Growing-Ansatz wurden folgende ausgewählt: Die absolute Neigung, die Neigungsänderung zwischen den Pixeln, die Spannweite der Exposition pro Anrisszone, die Expositionsänderung zwischen den Pixeln und als letzter Parameter die absolute Rauigkeit. Der einzige Faktor, der anfänglich als möglich bezeichnet wurde, nun aber nicht in den Algorithmus einbezogen wird, stellt die Krümmung dar. Um zu entscheiden, ob der Parameter Krümmung einbezogen werden soll oder nicht, wurde die in den Anrisszonen vorhandene Krümmung untersucht.

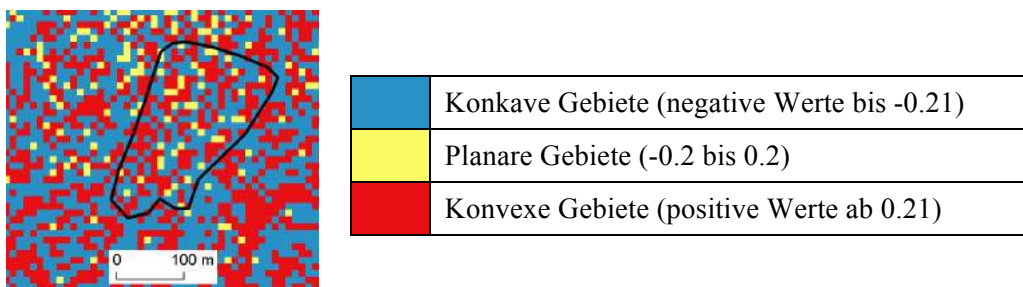


Abbildung 4.8: Krümmung in Anrisszone

Wie in Abbildung 4.8 zu erkennen, handelt es sich dabei aber um ein „Schachbrett“ zwischen konkaven und konvexen Pixeln, was die Festsetzung einer Spannbreite fast unmöglich macht. Würden alle konkaven und konvexen Werte, welche innerhalb der Anrisszone vorkommen, auch ausserhalb der Anrisszone hinzugefügt werden, diente dies nicht wirklich einer Eingrenzung. Aus diesen Gründen wurde der Parameter beim Region-Growing-Ansatz schliesslich weggelassen, bei der deskriptiven Statistik der Anrisszonen und Hänge wurde er aber einbezogen.

### 4.3.3 Schwellenwertsetzung der gewählten Parameter

Für die nun festgelegten Parameter folgte als nächster Schritt die Schwellenwertsetzung, um Hänge zu extrahieren. Dabei ist allerdings im Voraus klarzustellen, dass sich die durch den Algorithmus ermittelten Hänge grundlegend von jenen durch Hand/Auge erkannten unterscheiden, da die im Algorithmus verwendeten Parameter sowie deren Schwellenwerte in der Karte nicht von Auge sichtbar sind. Folglich werden durch den Menschen andere Entscheidungen über Zugehörigkeit getroffen.

Nach Eiben et al. (1999) ist das Anpassen von Schwellenwerten von Hand eine gängige Methode. Normalerweise wird ein Parameter nach dem anderen angepasst, obwohl dies suboptimale Schwellenwertsetzung verursachen kann, da die verschiedenen Parameter miteinander interagieren. Mehrere Parameter gleichzeitig zu verändern, setzt aber Unmengen von Versuchen voraus bis hin zur optimalen Lösung. Zusammenfassend sind Parameter zwar nicht unabhängig, alle Kombinationen verschiedener Parameter gleichzeitig zu testen erscheint allerdings unmöglich. Auch wenn einer nach dem anderen angepasst wird, nimmt die Schwellenwertsetzung viel Zeit in Anspruch und obwohl viel Mühe in die Wahl der Schwellenwerte gesteckt wurde, müssen die Werte nicht zwingend optimal sein. Mit diesen Voraussetzungen wurde ein Schwellenwert nach dem anderen gesetzt. In einem ersten Schritt wurde der entstandene Algorithmus bei einer Auflösung von 2 m durchgeführt, später wurde

dann auf 10 m umgestellt. Folglich wurden die Schwellenwerte ursprünglich für eine 2 m-Auflösung ermittelt und anschliessend auf die 10 m-Auflösung angepasst. Bei jedem Schwellenwert wird die Handhabung der Umstellung von 2 m auf 10 m diskutiert.

In den folgenden Abschnitten wird die Wahl der einzelnen Schwellenwerte genauer erläutert. Die Reihenfolge der Kapitel entspricht der Reihenfolge der Wahl der Schwellenwerte.

### Absolute Neigung

Lawinen treten an Hängen mit einer Neigung von 30° bis 60° auf (Maggioni & Gruber, 2003). Unter 30° ist der Hang zu flach, damit eine Lawine ausgelöst werden kann, über 60° hingegen ist der Hang zu steil, als dass sich überhaupt Schneemassen anlagern könnten. Deswegen wurde grundlegend festgelegt, dass nur Pixel **zwischen 30° und 60°** zur Region hinzugezählt werden können. Abbildung 4.9 zeigt einen Ausschnitt von Anrisszonen mit der Neigung, eingeteilt in zwei Klassen: Grün erfüllt die Bedingungen, gelb hingegen zeigt die zu steilen/flachen Gebiete auf.

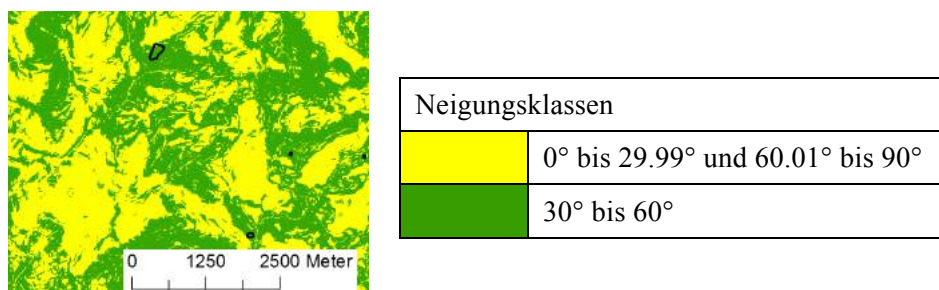


Abbildung 4.9: Neigungskarte, eingeteilt in zwei Klassen

### Expositionsänderung

Mit der Funktion „Minimum Bounding Geometry“, welche im Kapitel 4.5.1 genauer erklärt wird, wurde für jede Lawinenanrisszone die Breite und Länge herausgegeben. Für jede Testlawine wurde die Exposition ermittelt und anschliessend die Spannweite der vorhandenen Werte ausgerechnet (Maximum minus Minimum). Um eine Ahnung zu bekommen, wie gross die Expositionsänderung pro Pixel sein könnte, wurde der Expositionsbereich jeder Lawine durch deren Breite geteilt. Der Range der Exposition durch deren Breite ergibt folglich eine sehr grobe Annäherung an die Änderung der Exposition pro Meter. Um nun die Änderung von Pixel zu Pixel zu ermitteln, musste der erhaltene Wert mit der Pixelgrösse multipliziert werden. Zusammen ergibt dies folgende Rechnung:

$$\text{Range der Exposition einer Lawine} / \text{Anrissbreite} * \text{Pixelgrösse}$$

Allerdings ist dabei zu bedenken, dass die minimale und maximale Exposition nicht zwingend an den am weitest entfernten Punkten der Anrissbreite liegen müssen, sondern dass auch inmitten der Lawine die Minima/Maxima auftreten können.

Dies wird in Abbildung 4.10 veranschaulicht.

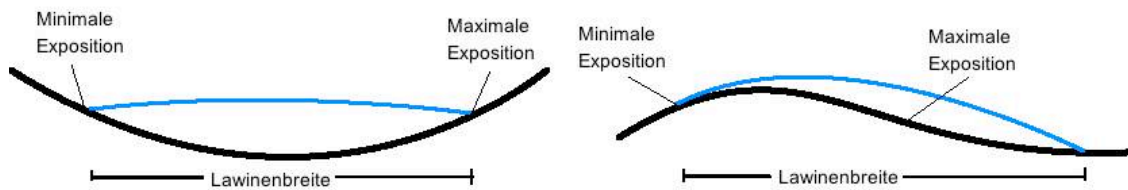


Abbildung 4.10: Minimum und Maximum der Exposition bei Anrisszonen (eigene Grafik)

Schwarz wird das Gelände (Hang) gezeigt, während die Anrissbreite in blau dargestellt ist. Links wird eine Anrisszone gezeigt mit konkaver Plankurvatur. Maximum und Minimum der Exposition treten hier optimal an den beiden entferntesten Stellen auf und die gesamte Breite liegt dazwischen. Dieser Fall passt in etwa auf die oben erklärte Rechnung. Der rechte Fall hingegen zeigt beispielhaft Anrisszonen, auf welche die Rechnung überhaupt nicht zutrifft. Zwischen Minimum und Maximum liegt nicht eine gesamte Breite. Folglich wechselt die Exposition von Pixel zu Pixel stärker als mit der oben genannten Rechnung ermittelt. Es ist klar, dass so bei der Ermittlung der Expositionsänderung ein gewisses Fehlerpotential besteht. Allerdings treten Anrisszonen vermehrt an konkaven Hängen auf, was diese Methode wiederum etwas rechtfertigt. Trotz grosser Unsicherheit liefert sie eine, wenn auch sehr grobe, Annäherung und deshalb wurde sie in einem ersten Schritt verwendet.

In Abbildung 4.11 wird die durchschnittliche Expositionsänderung nach obiger Berechnung von Pixel zu Pixel bei den 24 Testlawinen bei einer Auflösung von 2 m aufgezeigt.

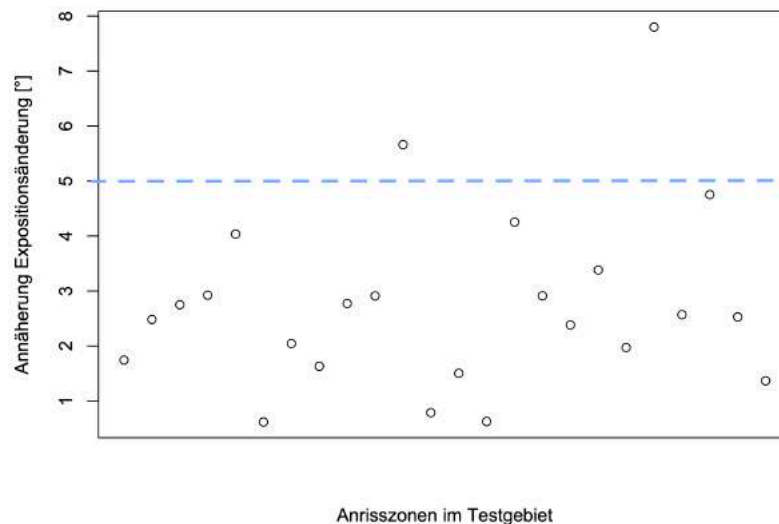
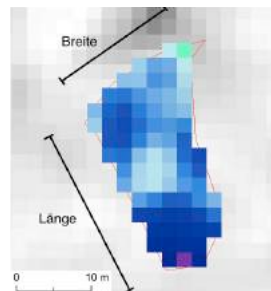


Abbildung 4.11: Berechnete Expositionsänderung von Pixel zu Pixel

Der blaue Strich zeigt den gesetzten Schwellenwert auf, er wurde auf  $5^\circ$  Änderung von Pixel zu Pixel gesetzt. Zwei Lawinen zeigen nach dieser Rechnung grössere Änderungen auf, diese wurden genauer untersucht.

Die Lawine mit dem höchsten durch diese Methode ermittelten Änderungs-Wert wird in Abbildung 4.12 genauer erläutert. Diese Anrisszone weist Werte von  $294.27^\circ$  bis  $0.03^\circ$  auf, wobei violett den Wert  $294.27^\circ$  darstellt und dieser von dunkelblau über hellblau zu türkis (=  $0.03^\circ$ ) verläuft. Wie vorher

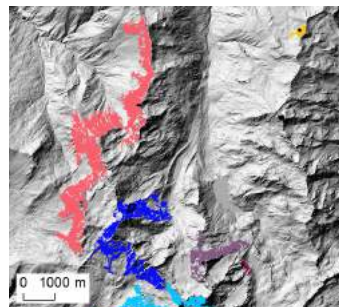
erwähnt, befindet sich die maximale und minimale Exposition nicht immer am Rande der Anrisszone. Maximum und Minimum liegen hier weitestmöglich entfernt, aber in Richtung der Hangneigung und nicht in Richtung der Breite. Allerdings ist ebenfalls zu erkennen, dass wie oben erwähnt die Exposition von der einen Seite her nicht stetig ab-/zunimmt, sondern dass die Richtung der Expositionsänderung variiert. Die Expositionsänderung dieser Anrisszone übersteigt folglich den gesetzten Schwellenwert, bei den anderen untersuchten Anrisszonen ist dies aber nicht der Fall.



**Abbildung 4.12: Anrisszone mit höchster Expositionsänderung**  
Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Beim Ändern der Auflösung von 2 m auf 10 m wurde folgende Überlegung betreffend Schwellenwert gemacht:

Wenn nun jedes Pixel à 2 m die  $5^\circ$  des Schwellenwertes „ausnutzt“, dann müsste bei einer Auflösung von 10 m eine Expositionsänderung von  $25^\circ$  erlaubt sein ( $5 \text{ Pixel à } 2 \text{ m} * 5^\circ \text{ Änderung von Pixel zu Pixel}$ ). Folglich wurde der Code mit dem Schwellenwert 25 ausprobiert und es entstanden riesige Regionen, wie in Abbildung 4.13 zu erkennen ist. Jeder ermittelte Hang wird in einer anderen Farbe dargestellt.



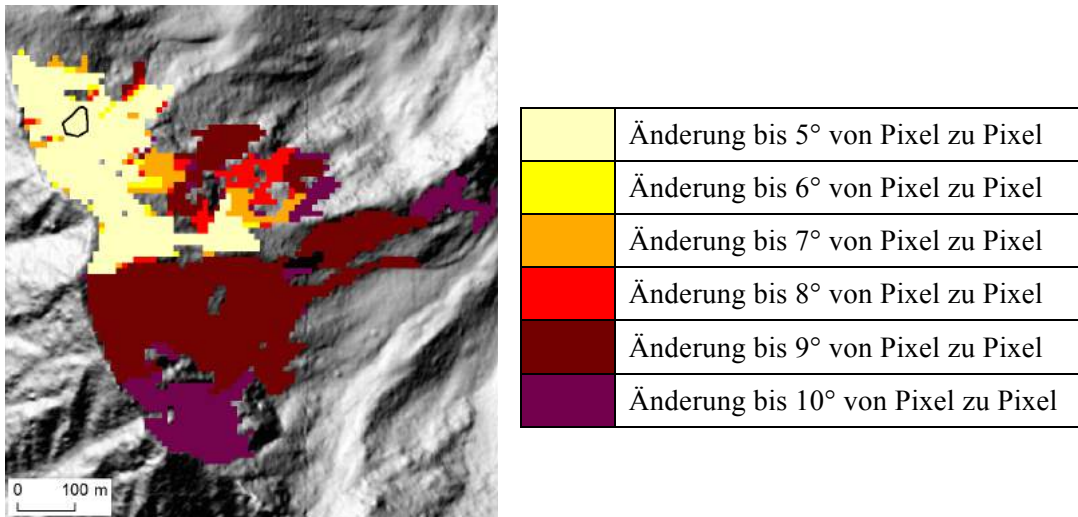
**Abbildung 4.13: Ermittelte Hänge für Schwellenwert  $25^\circ$**   
Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Um diesen riesigen Regionen entgegenzuwirken, wurde testweise der Schwellenwert von  $5^\circ$  aus der 2 m-Auflösung ebenfalls für die 10 m-Auflösung übernommen und die Ergebnisse beider Auflösungen wurden miteinander verglichen. Interessanterweise unterscheiden sich die Gebiete der 10 m-Auflösung trotz verhältnismässig viel kleinerem Schwellenwert nicht wirklich von jenen mit 2m-Auflösung. Deshalb wurden im Bereich von  $5^\circ$  nun mit der 10 m-Auflösung weitere Tests durchgeführt, um den perfekten Schwellenwert zu ermitteln. Dies wurde für jeden Wert von  $5^\circ$  bis  $10^\circ$  durchgeführt.

Anhand von Gebieten im Gelände, welche von Auge her aufgrund von markanten Kämmen nicht mehr zum gleichen Hang zugeordnet würden, konnten die potentiellen Schwellenwerte  $5^\circ$  bis  $10^\circ$

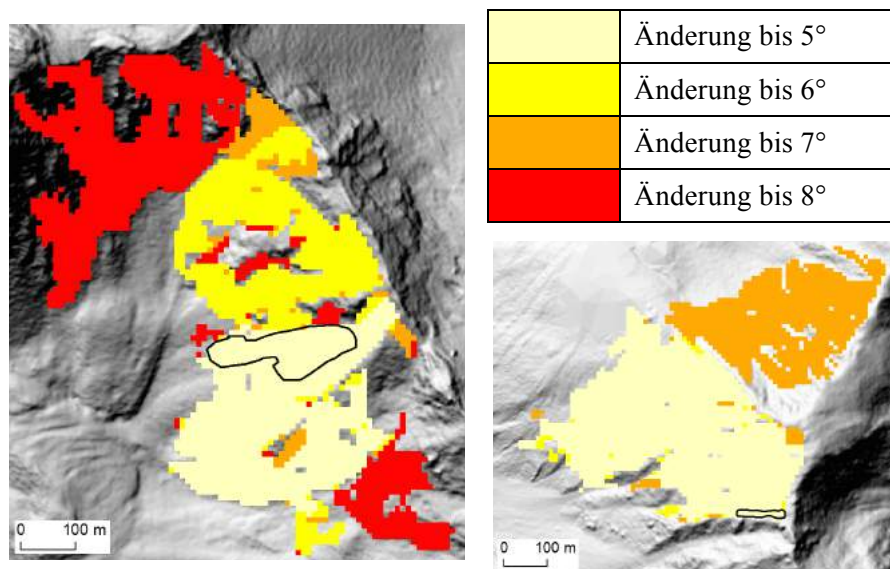


genauer untersucht werden. Zu grosse Werte würden dabei mögliche Kämme einfach übergehen und zum selben Hang zählen. Nach dem „Ausscheidungsprinzip“ konnte so ein Schwellenwert festgesetzt werden. Es folgen einige Beispiele für die Eliminierung der einzelnen potentiellen Schwellenwerte hin zur Festsetzung des gewählten Schwellenwertes.



**Abbildung 4.14: Ermittelter Hang bei Expositionsänderung < 5° bis zu < 10°**  
 Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

In Abbildung 4.14 existiert ein Kamm im DHM, welcher die Grenze zwischen gelb-roten Gebieten und den dunkelroten Regionen bildet. Die Schwellenwerte 9° und 10° überschreiten diesen Kamm, deshalb konnten diese beiden potentiellen Schwellenwerte als zu gross eingestuft werden. Folglich wurden weiterhin die Schwellenwerte 5° bis 8° in Betracht gezogen.



**Abbildung 4.15: Schwellenwert Expositionsänderung < 5° bis < 8° (links), < 5° bis < 7° (rechts)**  
 Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Derselbe Fall trifft in Abbildung 4.15 auf den potentiellen Schwellenwert 8° (rot) links, sowie auf das orange Gebiet (7°) rechts zu. Diese beiden Werte wurden dementsprechend auch ausgeschlossen als potentielle Schwellenwerte. So blieben zur genaueren Betrachtung maximal 5° oder 6° Expositionsänderung von Pixel zu Pixel.

Bei der genaueren Betrachtung fällt auf, dass der Schwellenwert  $6^\circ$  alle von Auge erkannten Hänge im Testgebiet korrekt eingrenzt. Dasselbe trifft selbstverständlich auf eine Expositionsänderung von maximal  $5^\circ$  zu, allerdings entstehen dabei zum Teil nur noch sehr kleine Regionen (und dementsprechend grosse Unterschiede zwischen der Ausbreitung bei maximal  $5^\circ$  oder  $6^\circ$ ). Ein grösserer Unterschied ist in Abbildung 4.16 zu sehen.  $6^\circ$  scheint ein sinnvoller Kompromiss zu sein, da Kämme in der Landschaft zum Abschlusskriterium führen, sich aber die Region dennoch maximal im vom Auge erlaubten Gebiet ausbreitet. Ausserdem mischen noch einige weitere Parameter im Algorithmus mit, deshalb soll die Expositionsänderung alleine nicht bereits zu viel ausschließen. Folglich wurde  **$6^\circ$  als Schwellenwert** festgesetzt.

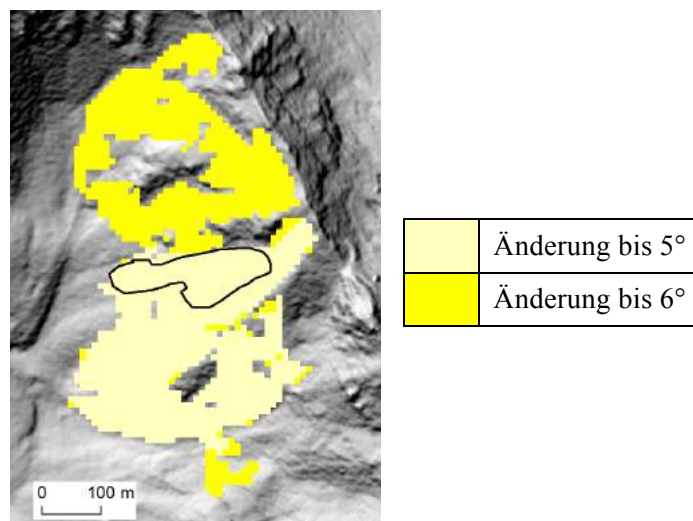


Abbildung 4.16: Schwellenwert Expositionsänderung  $< 5^\circ$  bis  $< 6^\circ$   
Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

### Rauigkeit

Lawinenniedergänge finden in den meisten Fällen oberhalb der Waldgrenze statt (Nairz et al., 2011). Um dennoch sicherzugehen, dass bewaldete Flächen nicht zur Region als potentieller Hang hinzugefügt werden, diente das Kriterium der Rauigkeit. Auch dieser Parameter wurde anhand des Testgebietes näher untersucht.

Bei einer Auflösung von 2 m weisen 69.6% der Test-Anrisszonen Maximalwerte tiefer als 0.5 auf, während bei 87.0% die maximale Rauigkeit unter 0.6 liegt. Lediglich drei Anrisszonen weisen vereinzelte Pixel höher als 0.6 auf, sieben Anrisszonen liegen über dem Wert 0.5. Es stellte sich also die Frage, welcher dieser beiden Schwellenwerte nun gesetzt werden soll. Die vereinzelten Pixel bei den Anrisszonen über diesen Werten wurden übergangen, da die Durchschnitte aller Anrisszonen zwischen 0.12 bis 0.29 lagen.

Die Wertebereiche der einzelnen Anrisszonen sind in Abbildung 4.17 visualisiert.

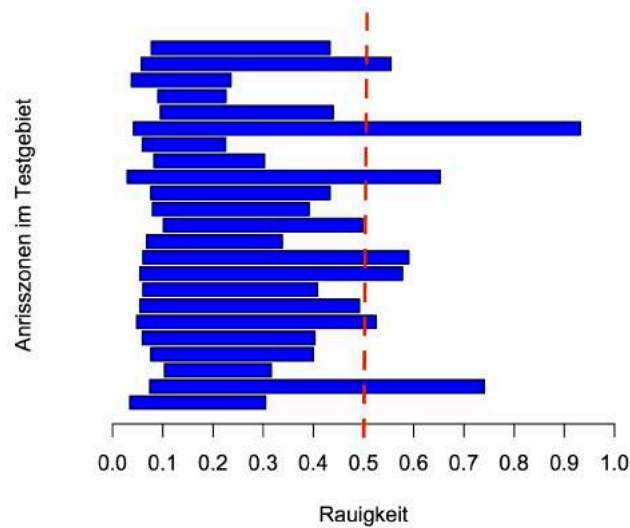


Abbildung 4.17: Vorhandene Spannweiten der Rauigkeit bei Anrisszonen im Testgebiet

Von dieser Verteilung ausgegangen, wurde die Schwellenwertsetzung bei 0.5 und 0.6 genauer studiert. Bei beiden waren Wälder bereits als mögliche Gebiete ausgeschlossen, allerdings wurden Gebäude beim Schwellenwert 0.6 zum Teil nicht erkannt, während jene bei 0.5 als unmögliches Gebiet bezeichnet wurden. Deshalb wurde **0.5 als Rauigkeits-Schwellenwert** festgelegt.

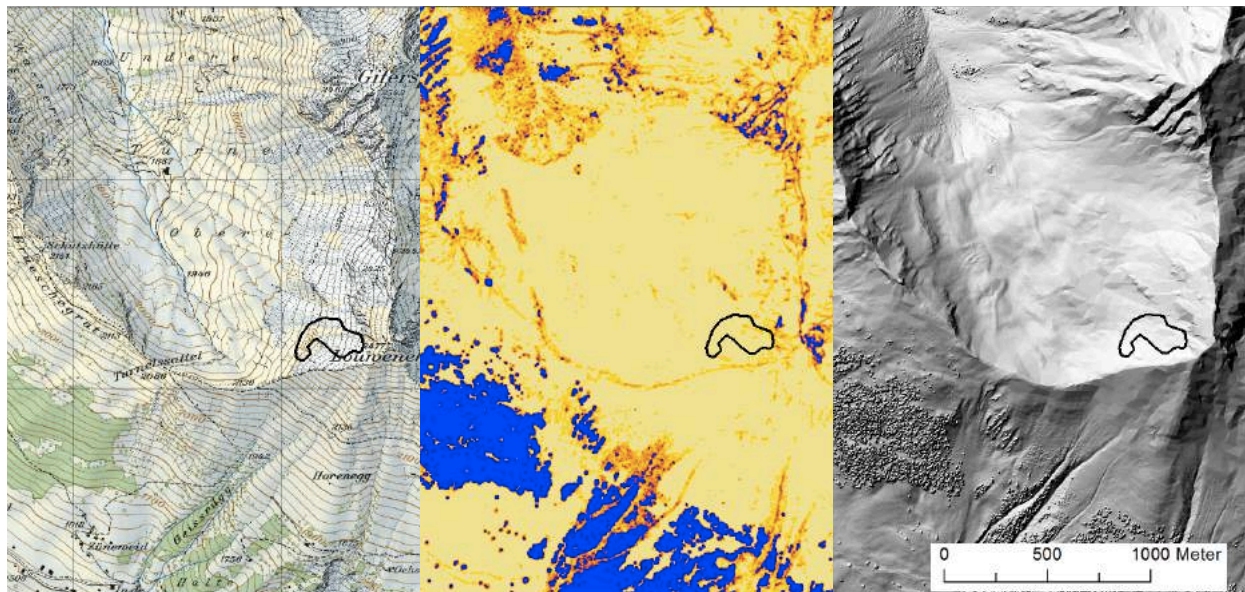


Abbildung 4.18: Schwellenwert für Rauigkeitswerte (Mitte) im Vergleich zur Pixelkarte und zum DOM  
Verwendete Daten: Pixelkarte 1:25'000 und Digitales Oberflächenmodell Hillshade von Swisstopo



In Abbildung 4.18 sind die Rauigkeitswerte zu erkennen. Die Abbildung soll zeigen, dass bewaldete Flächen durch den gewählten Schwellenwert als mögliche Gebiete ausscheiden. Die Vergleiche mit der PK 25 und dem DOM zeigen, dass die Filterung Wald/Nicht-Wald funktioniert. In einer ersten Berechnung wurde das swissALTI3D verwendet, dementsprechend wurden Waldflächen nicht erkannt. Deswegen war die Umstellung auf das DOM notwendig. Es ist zudem zu erkennen, dass in

unbewaldetem Gelände wenig Rauigkeitswerte über 0.5 auftauchen. Diese liegen alle in rauen Gebieten nahe bei Gipfeln/Kämmen.

Um die Rauigkeitswerte für die 10 m-Auflösung zu erhalten, wurden die Werte der 2 m-Auflösung, welche durch die Methode aus Kapitel 4.3.1 ermittelt wurden, auf die schlechtere Auflösung hochgerechnet. So konnte dieser Schwellenwert beibehalten werden. Grössere Gebäude können so durch den Schwellenwert von 0.5 immer noch ausgeschlossen werden.

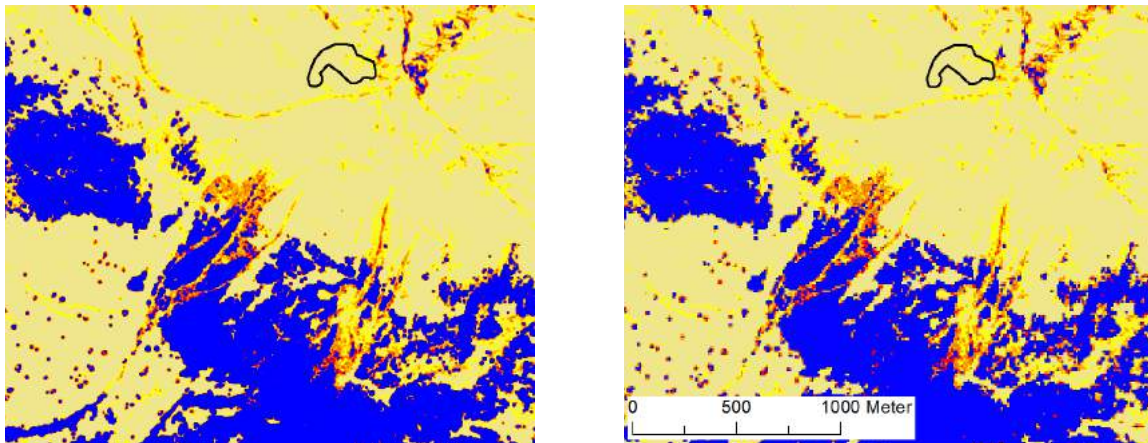


Abbildung 4.19: Vergleich Rauigkeit 2 m-Auflösung (links) und 10 m-Auflösung (rechts)

In Abbildung 4.19 ist ersichtlich, dass die Änderung der Auflösung von 2 m auf 10 m keine grossen Unterschiede bezüglich Rauigkeitswerte zur Folge hat.

### Neigungsänderung

Als nächster Schwellenwert musste die Neigungsänderung pro Pixel festgelegt werden. Schmid (2014) musste in seinem Ansatz ebenfalls einen Schwellenwert bestimmen: Er wählte in seiner Masterarbeit für die Murkegelextraktion bei einer Auflösung von 2 m als Schwellenwert ein Neigungsverhältnis von 0.985 und für eine Auflösung von 25 m 0.85. Da in der vorliegenden Arbeit zu Beginn ebenfalls eine 2 m-Auflösung verwendet werden sollte, wurde jener Schwellenwert zur Überprüfung übernommen: Als einzige Bedingung wurde der Python-Code mit dem Neigungsverhältnis  $> 0.985$  gestartet und dabei kamen Regionen heraus nur minimal grösser als die Anrisszonen. Diese Regionen sind der Abbildung 4.20 zu entnehmen. In rot sind die Eingabedaten (= Anrisszonen) zu erkennen, in blau die hinzugekommenen Pixel, welche die Bedingung Neigungsverhältnis  $> 0.985$  erfüllen.

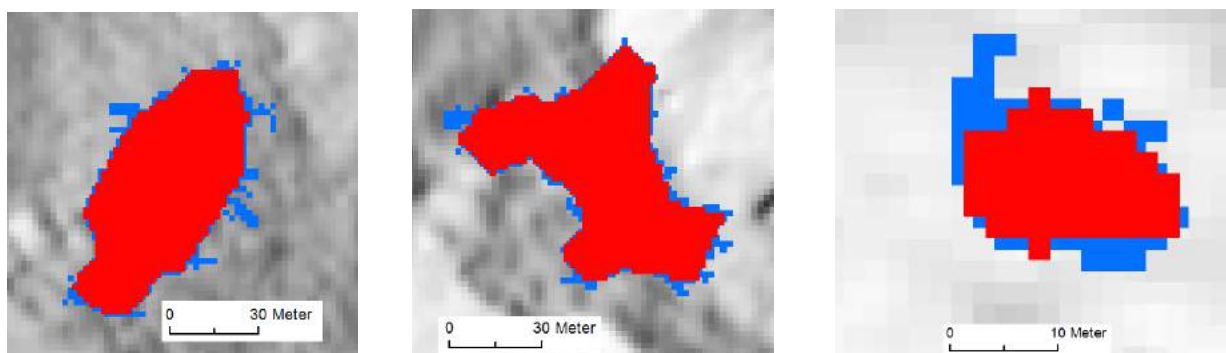
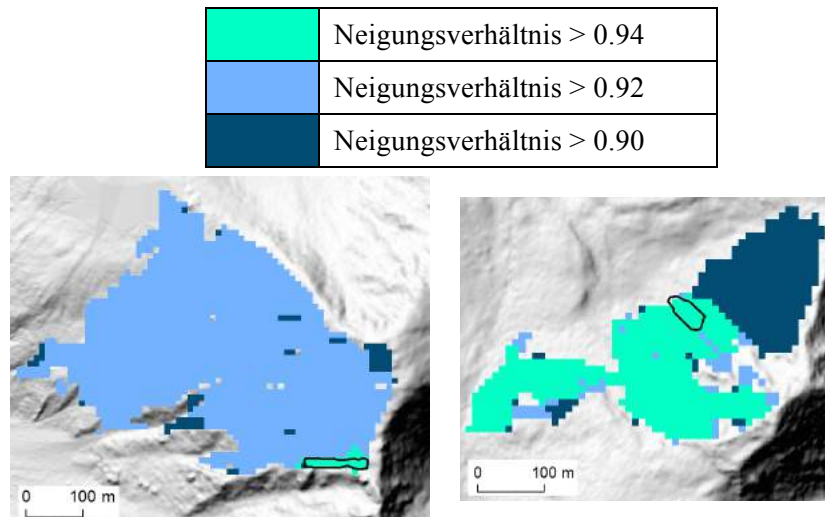


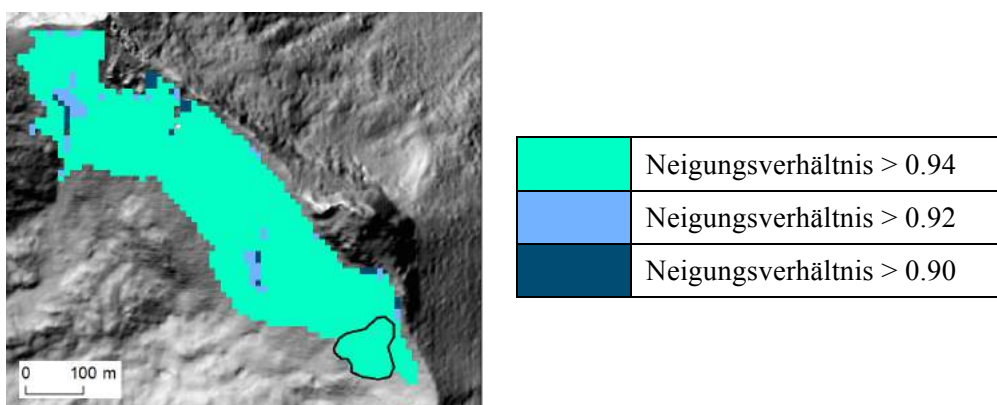
Abbildung 4.20: Ermittelte Hänge beim erlaubten Neigungsverhältnis  $> 0.985$   
Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Da dieses Verhältnis nicht viel Wachsen der Regionen zulassen würde, musste es für diese Arbeit etwas nach unten angepasst werden. Für die 2 m-Auflösung wurden mehrere Tests durchgeführt. Schliesslich wurden die Verhältnisse 0.9, 0.92 und 0.94 genauer angeschaut. Die entstandenen Regionen wurden visualisiert und untersucht.



**Abbildung 4.21: Schwellenwertsetzung Neigungsverhältnis**  
 Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

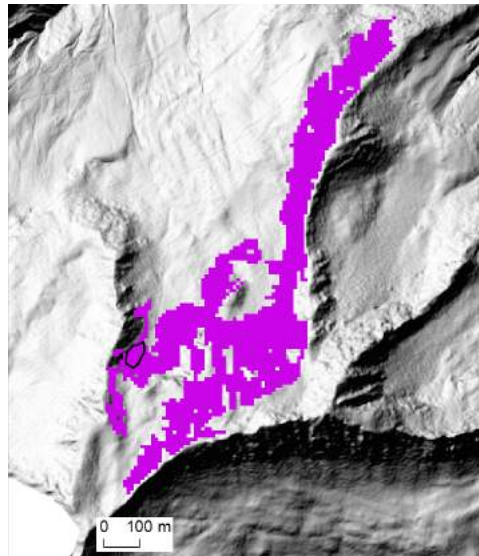
Während ein Schwellenwert von 0.94 zum Teil sehr kleine Gebiete liefert (Abbildung 4.21, links), werden beim Schwellenwert 0.9 oftmals auch steile Geröll-Hänge toleriert und die Regionen pflanzen sich über Kämme hin fort (Abbildung 4.21, rechts). Es existieren aber auch Hänge, bei denen kaum Unterschiede zwischen den Ergebnissen der drei Schwellenwerte zu erkennen sind (siehe Abbildung 4.22).



**Abbildung 4.22: Kaum erkennbare Unterschiede zwischen verschiedenen Ergebnissen der Schwellenwerte**  
 Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Wie auch bereits bei der Expositionsänderung wurde auf den mittleren Wert gesetzt, da möglichst viel hinzukommen sollte, aber Kämme und Erhebungen den Hang trotzdem begrenzen sollten. Als Schwellenwert wurde also 0.92 festgelegt. Auch hier stellte sich bei der Änderung von der 2 m- auf die 10 m-Auflösung die Frage nach dem Schwellenwert. Darf sich ein 2 m-Pixel um 0.92 vom

Nachbarn unterscheiden, so wären das für 10 m (5 Pixel à 2 m)  $0.92^5 = 0.66$  als Schwellenwert. Auch dieser wurde im Code ausprobiert und lieferte grosse Gebiete (Abbildung 4.23).



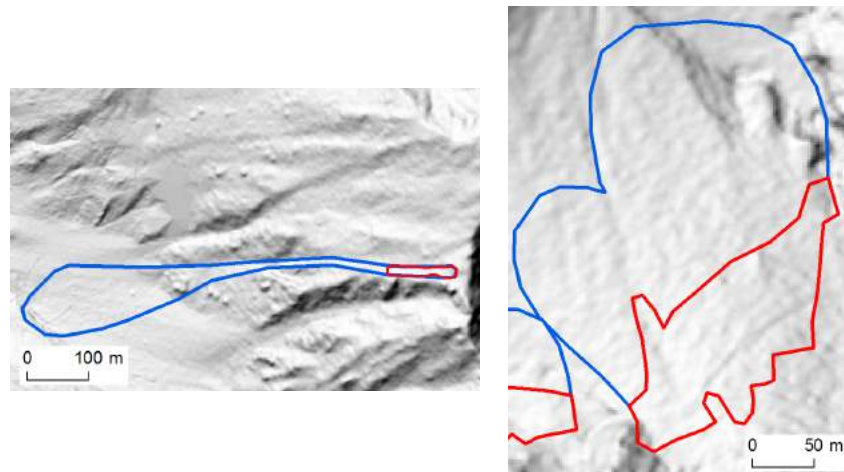
**Abbildung 4.23: Schwellenwert Neigungsverhältnis > 0.66**  
Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Deshalb wurde bei der 10 m-Auflösung ebenfalls der **Wert 0.92** erprobt und lieferte auch erstaunlich grosse (etwa gleich grosse wie bei der 2 m-Auflösung) Regionen. So wurde dieser Schwellenwert trotz schlechterer Auflösung beibehalten.

### Spannweite der Exposition

Als letzter Schwellenwert wurde die Spannweite der Exposition pro Anrisszone festgelegt. Diese wurde erst später zum Code hinzugenommen, um stetig wachsenden Hängen entgegenzuwirken. Schliesslich bestünde ohne diesen Parameter die Möglichkeit, dass jede Region um einen Berg herum auf 360° wachsen könnte, solange die Änderung von Pixel zu Pixel kleiner als 6° ist (und alle anderen Bedingungen eingehalten werden). Diesem Vorgang sollte mit diesem Parameter entgegengewirkt werden.

In einem ersten Versuch wurden Minima und Maxima der Expositionswerte pro Anrisszone verwendet und ein absoluter Betrag addiert respektive subtrahiert, sodass als Schwellenwerte ein Expositions-Minimum (Minimum der Anrisszone – Betrag) und ein Expositions-Maximum (Maximum der Anrisszone + Betrag) verwendet wurden. Dies wurde probierhalber mit 1° als Betrag ausprobiert, sodass Pixel zu Regionen nur noch hinzugefügt werden dürfen, wenn diese zwischen den beiden Schwellenwerten (Minimum der Anrisszone -1° und Maximum der Anrisszone +1°) liegen. Da aber ebenfalls alle in der Anrisszone vorhandenen Werte für die Hänge wiederverwendet werden dürfen, können je nach Lawine bereits bei 1° als Betrag riesige Breiten der Hänge entstehen. Des Weiteren werden bei dieser Variante bei einer Anrisszone mit sehr grosser Spannbreite und einer Anrisszone mit sehr kleiner Spannbreite der gleiche Range hinzugefügt, was überhaupt nicht verhältnismässig ist. Als Beispiel folgen in Abbildung 4.24 zwei Lawinen.



**Abbildung 4.24: Unterschiedliche Breiten von Anrisszonen**  
 Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Die Dimensionen der Breite dieser beiden Anrisszonen – in der Abbildung in rot, Lawinenumrisse in blau – sind völlig unterschiedlich. Deshalb wurde eine zweite Variante in Betracht gezogen, welche mit dem Mittelwert der Anrisszonen und deren Standardabweichung arbeitet:

Die Standardabweichung der einzelnen Anrisszonen soll die minimalen und maximalen Schwellenwerte bilden durch Subtraktion/Addition vom/zum Mittelwert. Dafür musste der Faktor der erlaubten Standardabweichung gewählt werden. Es wurden Werte von 1 bis 10-mal die Standardabweichung angeschaut. Von 5 bis 10-mal die Standardabweichung wurden bei einigen Lawinen beim erlaubten Range Werte über  $360^\circ$  erzielt, sodass der Faktor klar zu hoch ist und dieser nicht als Schwellenwert verwendet werden kann. Auch bei der Standardabweichung  $\cdot 4$  wird als höchster Wert  $300.64^\circ$  als Spannweite erreicht, was noch nicht wirklich eingrenzend ist. Deshalb wurden die Werte von 1 bis 3-mal die Standardabweichung genauer angeschaut. Bei einer Standardabweichung  $\cdot 1$  würde allerdings bei jeder einzelnen Anrisszone nichts an Exposition hinzukommen dürfen, sondern Werte ausserhalb der Anrisse können nicht einmal die ganze Spannbreite der Exposition innerhalb der Anrisszone wiedergeben. In den folgenden Abbildungen werden die Werte mit 2-mal, 2.5-mal und 3-mal die Standardabweichung genauer betrachtet. In diesen Plots ist in x-Richtung die tatsächliche Spannweite der Expositionswerte jeder Anrisszone ersichtlich. In y-Richtung wird gezeigt, wie sich die Spannweite jeder Region je nach Schwellenwert (Faktor der Standardabweichung) von der tatsächlichen Spannbreite der Expositionswerte in den Anrisszonen unterscheidet. Alle Punkte unterhalb der blauen Linie dürfen ausserhalb der Anrisszone nur einen kleineren Wertebereich als die Anrisszone selbst verwenden, während die Punkte oberhalb der blauen Linie um so viel Grad an Exposition mehr zur Region hinzufügen dürfen. Punkte an der blauen Linie zeigen folglich innerhalb und ausserhalb der Anrisszone etwa denselben Wertebereich.

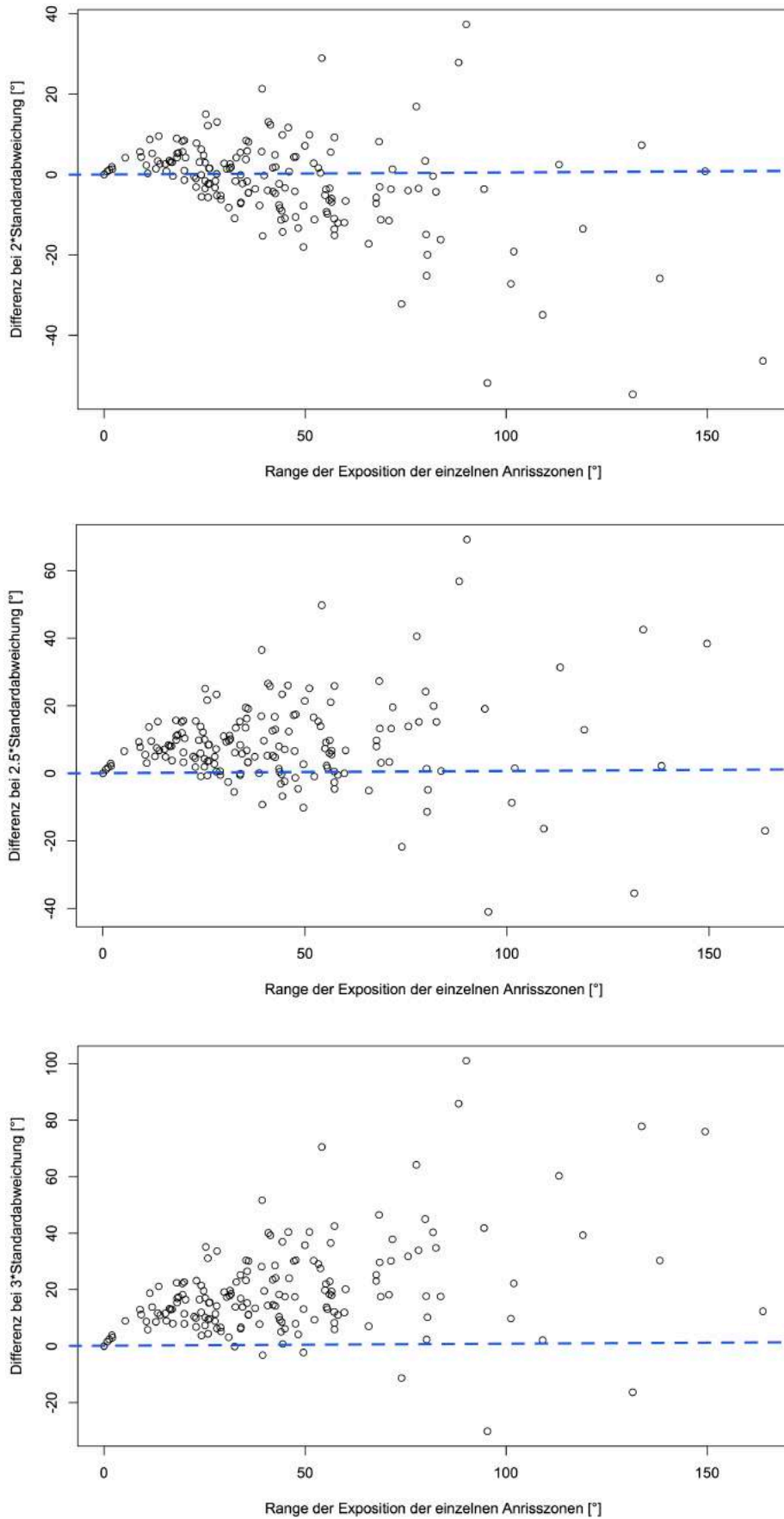
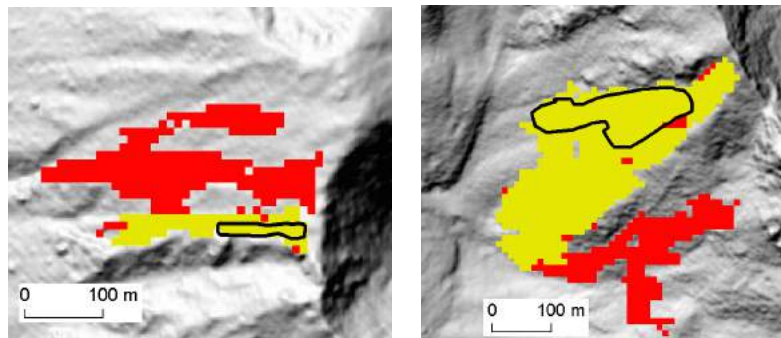


Abbildung 4.25: Differenz zwischen Spannweite der Anrisszonen und möglicher Spannweite der Exposition je nach Schwellenwertsetzung



Beim Faktor 2 liegen doch noch viele Anrisszonen im negativen Bereich, welche bei diesem Schwellenwert folglich ausserhalb der Anrisszone nicht einmal mehr die Werte innerhalb der Anrisszone hinzunehmen dürfen. Deshalb wurden die Werte 2.5 und 3 genauer angeschaut. Bei 3 trifft die obige Problematik auf weniger Anrisszonen zu, bei der Visualisierung fällt allerdings auf, dass viele sogenannte „Anhängsel“ (längliche Fortpflanzung des Hanges, welche als unsinnig erachtet wird; zwei Beispiele sind in Abbildung 4.26 zu finden) hinzugefügt werden, die eigentlich vermieden werden sollten. Deshalb wurde der Wert **2.5-mal die Standardabweichung** als Schwellenwert gesetzt, da jener eine gute Balance zwischen wenigen negativen Werten oder zumindest nur minimal negativen Werten und wenigen Anhängseln bietet.



**Abbildung 4.26: Beispiele für Anhängsel durch erlaubte Spannbreite der Standardabweichung \* 3**  
 Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo



Damit weisen 16.9% der Anrisszonen Schwellenwerte auf, die kleinere Expositionswerte ausserhalb der Anrisszone erlauben, als diese innerhalb der Anrisszone bestehen. Davon befinden sich allerdings 9.9% im Bereich von  $0^\circ$  bis  $-5^\circ$  Unterschied, folglich werden diese Hänge nicht allzu sehr beschränkt. Die restlichen 7% weisen Negativwerte von  $-5.52^\circ$  bis  $-41.01^\circ$  auf und verlieren dementsprechend ausserhalb der Anrisszone relativ viel an Ausbreitungsmöglichkeit.

## 4.4 Region-Growing-Algorithmus

Zur Ermittlung des Hanges rund um Anrisszonen wurde ein Region-Growing-Ansatz verwendet. Anhand verschiedener Parameter sollte also um die Anrisszone herum eine Region entstehen, welche den gesetzten Schwellenwerten entspricht und so um die Anrisszone die weitere mögliche Anrissfläche im Hang wiedergibt. Um diesen Ansatz anzuwenden, waren zwei verschiedene Datensätze nötig: Einerseits die digitalisierten Lawinanrisszonen, andererseits das Digitale Höhenmodell. Aus Weiterem wurde, wie im Kapitel 4.3.1 erklärt, die Hangneigung, die Exposition und die Rauigkeit des Bodens ermittelt.

Das Programm sollte ASCII-Dateien (genauer: Esri Ascii Grid Format), in ArcMap erstellt, einlesen, anhand dieser den Region-Growing-Ansatz durchführen und das Resultat anschliessend wieder zu einem ASCII-File konvertieren. Danach wurde dieses in ArcMap visualisiert, sodass die Ergebnisse angeschaut werden konnten. Für diese Schritte muss einerseits die Auflösung sowie andererseits mindestens eine einzelne Koordinate des Rasters bekannt sein, normalerweise jene links unten (Pike et al., 2009).

```
ncols      4000
nrows     4000
xllcorner  2563067.1880349
ylcorner  1078949.2909383
cellsize   10
NODATA_value -9999
1280.774 1277.653 1287.586 1282.513 1282.215 1268.13 1276.656 1266.883 1277.42 1276.69 1278.271 1272.365 1287
1300.305 1288.328 1308.687 1308.953 1292.417 1295.845 1298.651 1300.927 1301.845 1302.598 1308.271 1319.221 1
1316.895 1327.2 1306.628 1324.512 1303.274 1324.546 1307.622 1311.549 1304.46 1297.92 1303.762 1305.019 1303.
1285.935 1284.409 1285.803 1279.995 1287.184 1293.65 1287.201 1270.522 1263.072 1265.097 1262.649 1256.7 1237
1221.071 1211.06 1205.428 1212.423 1188.769 1174.981 1174.061 1178.927 1163.721 1161.002 1161.831 1161.202 11
1136.889 1128.34 1121.951 1111.731 1102.702 1089.718 1088.975 1088.225 1078.761 1065.898 1051.409 1045.653 10
1007.694 1007.168 994.6557 989.2457 974.9897 976.7822 971.484 968.4313 963.6688 957.5684 950.4417 939.189 927
```

Abbildung 4.27: Aufbau einer ASCII-Datei, hier das DOM für die Rauigkeitsberechnung der Zone 1

Solche ASCII-Files zeigen diese Informationen schön strukturiert auf (siehe Abbildung 4.27). Die Information *ncols* zeigt die Anzahl der Kolonnen auf, *nrows* jene der Reihen. Die Koordinaten bei *xllcorner* und *ylcorner* dienen als Referenz, sodass die Werte einem bestimmten Ort zugeordnet werden können. Die Zellengrösse beträgt hier 10 m, der *NODATA-Value* -9999, welcher Pixel ohne Werte widerspiegelt. Der Wert -9999 tritt in dieser Arbeit zum Beispiel im Ausland nahe der Schweizer Grenze auf, da jene Pixel aufgrund eines rechteckigen Untersuchungsgebietes zwar miteinbezogen werden, allerdings keine DHM-Werte aufweisen.

### 4.4.1 Beschreibung des Codes

Grosse Teile des Codes konnten aus der Masterarbeit von Schmid (2014) übernommen werden. Hier erfolgen Erklärungen zu Teilabschnitten des Codes, wobei alle wichtigen Schritte kurz erläutert werden. Der gesamte Code kann der beigelegten CD entnommen werden. Zuerst wird aber das Vorgehen des Algorithmus in Abbildung 4.28 gezeigt.

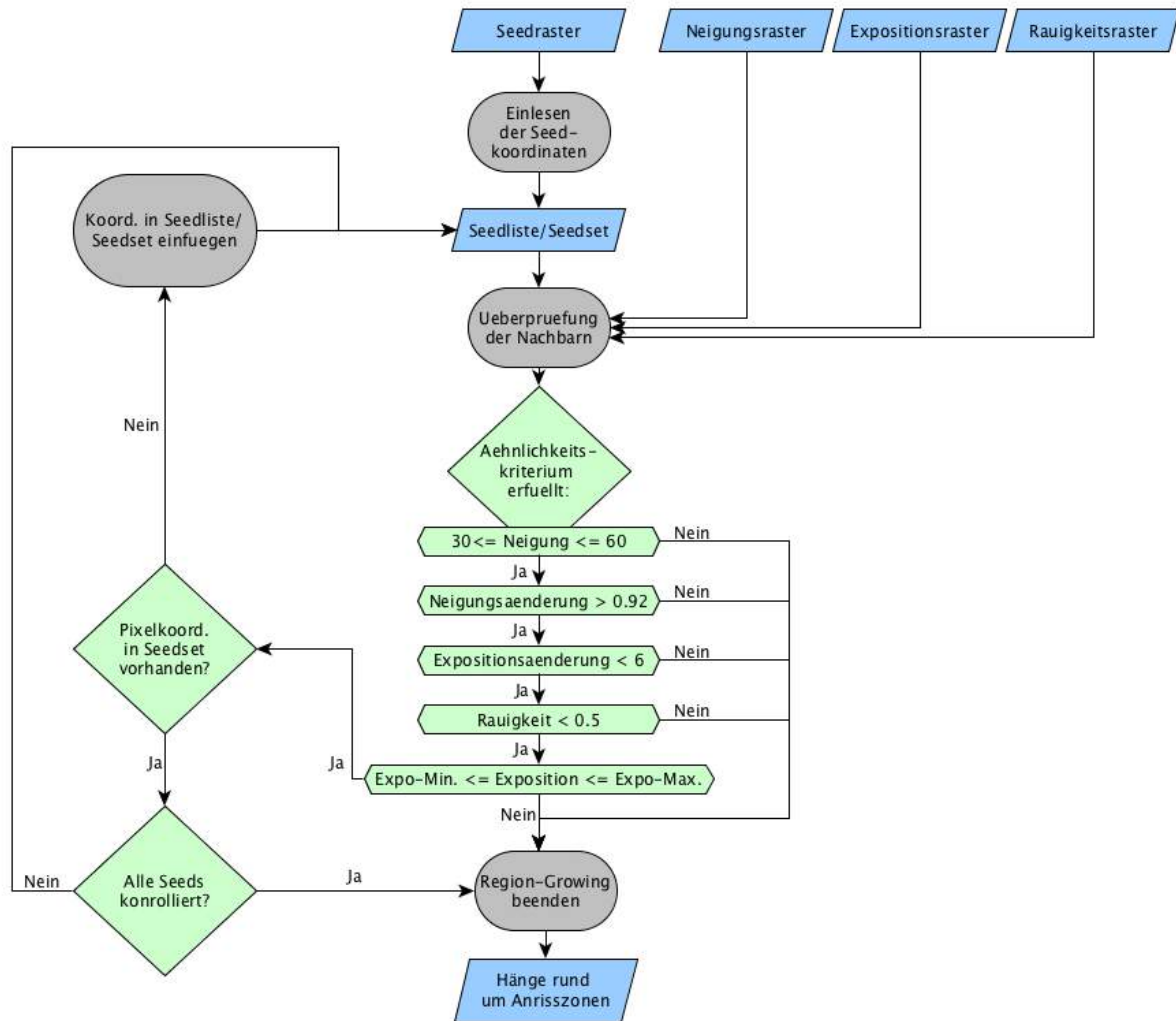


Abbildung 4.28: Flussdiagramm Region-Growing (Struktur übernommen von Schmid (2014))

### (1) Konversion von ASCII-Dateien zu numpy Arrays:

In einem ersten Schritt muss die Esri ASCII-Struktur zu numpy Arrays umgewandelt werden. Dafür werden alle benötigten Input-Dateien konvertiert, sodass sie danach als numpy Array zur weiteren Verarbeitung zur Verfügung stehen.

### (2) Berechnung Rauigkeitsindex

Die Berechnung des Rauigkeitsindexes konnte von Schmid (2014) übernommen werden, welcher den Ansatz von Cavalli & Marchi (2008) verwendete. Genauere Erklärungen zu dieser Berechnung sind in Kapitel 4.3.1 zu finden.

### (3) Seedlisten-Generierung:

Es wird eine Seedliste und ein Seedset erstellt, welche alle Seedpixel inklusive deren Koordinaten enthalten. Die Seedpixel werden dem *inseed\_array* – in obiger Abbildung „Seedraster“ genannt – entnommen, welcher drei verschiedene Werteklassen aufweist:

- Lawinennummer: An jenen Stellen, wo eine Anrisszone vorhanden ist, wird dies über die Lawinennummer als Seedpixel definiert.

- 0: Rund um die Anrisszonen zeigen Nullwerte auf, dass dort keine Anrisszonen vorhanden sind.
- -9999: Für Gebiete ohne Daten, in diesem Fall also ausserhalb der Schweiz.

Die Seedliste und das Seedset zeigen dieselben Werte auf, das Seedset ist allerdings in der Suche nach bestimmten Einträgen effizienter.

#### (4) Region Growing

Für den Region-Growing-Ansatz wird eine Nachbarschaftsmatrix verwendet. Diese muss allerdings zuerst einmal generiert werden. Je nach Ort des Auftretens in einer Matrix kann ein Pixel acht, fünf oder drei Nachbarn aufweisen. In Abbildung 4.29 weist Pixel Nummer 5 acht Nachbarn auf, während die Randpixel 2, 4, 6 und 8 nur fünf Nachbarn aufweisen. Pixel in einer Ecke wie 1, 3, 7 und 9 haben sogar nur drei nächste Nachbarn.

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Abbildung 4.29: Anzahl Nachbarn

Diese Nachbarschaft musste also zuerst einmal impliziert werden.

```
# Get neighbours of seedpixels: in case of 8 connected neighbours-----
if x_coord > 0 and x_coord < nrows_inseedarray-1 and y_coord > 0 and y_coord < ncols_inseedarray-1:
    neighbours = np.zeros(8,dtype='float32,float32, float32,int64,int64')
    neighbours[:] = [(slope_array[x_coord-1][y_coord-1], aspect_array[x_coord-1][y_coord-1], roughness_array[x_coord-1][y_coord-1], x_coord-1,y_coord-1),
                    (slope_array[x_coord-1][y_coord], aspect_array[x_coord-1][y_coord], roughness_array[x_coord-1][y_coord], x_coord-1,y_coord),
                    (slope_array[x_coord-1][y_coord+1], aspect_array[x_coord-1][y_coord+1], roughness_array[x_coord-1][y_coord+1], x_coord-1,y_coord+1),
                    (slope_array[x_coord][y_coord-1], aspect_array[x_coord][y_coord-1], roughness_array[x_coord][y_coord-1], x_coord,y_coord-1),
                    (slope_array[x_coord][y_coord], aspect_array[x_coord][y_coord], roughness_array[x_coord][y_coord], x_coord,y_coord),
                    (slope_array[x_coord][y_coord+1], aspect_array[x_coord][y_coord+1], roughness_array[x_coord][y_coord+1], x_coord,y_coord+1),
                    (slope_array[x_coord+1][y_coord-1], aspect_array[x_coord+1][y_coord-1], roughness_array[x_coord+1][y_coord-1], x_coord+1,y_coord-1),
                    (slope_array[x_coord+1][y_coord], aspect_array[x_coord+1][y_coord], roughness_array[x_coord+1][y_coord], x_coord+1,y_coord),
                    (slope_array[x_coord+1][y_coord+1], aspect_array[x_coord+1][y_coord+1], roughness_array[x_coord+1][y_coord+1], x_coord+1,y_coord+1)]

# Get neighbours of seedpixels: border locations where not all 8 neighbours are reachable-----
# seed pixel at left upper corner
elif x_coord == 0 and y_coord == 0:
    neighbours = np.zeros(3,dtype='float32, float32, float32,int64,int64')
    neighbours[:] = [(slope_array[x_coord][y_coord+1], aspect_array[x_coord][y_coord+1], roughness_array[x_coord][y_coord+1], x_coord,y_coord+1),
                    (slope_array[x_coord+1][y_coord], aspect_array[x_coord+1][y_coord], roughness_array[x_coord+1][y_coord], x_coord+1,y_coord),
                    (slope_array[x_coord+1][y_coord+1], aspect_array[x_coord+1][y_coord+1], roughness_array[x_coord+1][y_coord+1], x_coord+1,y_coord+1)]
```

Abbildung 4.30: Nachbarschaft im Region-Growing-Algorithmus

Für jedes Zentralpixel wird folglich eine Nachbarschaftsmatrix gebildet. Wie in Abbildung 4.30 zu erkennen ist, wird das Pixel zuerst auf den Ort des Vorkommens untersucht. Für jede Möglichkeit auf Nachbarschaft (inmitten des Rasters, an vier unterschiedlichen Rändern oder in einer der vier Ecken) wird diese anders definiert. In der Abbildung ist der Fall für Pixel inmitten des Rasters sowie für die linke obere Ecke aufgezeigt. Jedesmal wird ein neuer Array mit der entsprechenden Anzahl Einträge erstellt. Jeder Eintrag stellt ein Nachbarspixel dar, mit definierter Verortung in Bezug auf das Zentralpixel, es wird ein kurzfristiges lokales Koordinatensystem gebildet. Der erste Eintrag (= 1. Zeile) für das obere Beispiel im Bild wird näher erläutert:

Da Python bei 0 zu zählen beginnt, sind in der 1. Zeile folgende Werte vorhanden: 0, 1, 2, 3, 4. An nullter Stelle ist der Neigungswert des Nachbarpixels zu finden: `slope_array[x_coord-1][y_coord-1]` Im ersten Feld (aber an 2. Stelle) ist der Expositionswert zu finden: `aspect_array[x_coord-1][y_coord-1]` Die zweite Stelle zeigt den berechneten Rauigkeitswert auf: `roughness_array[x_coord-1][y_coord-1]` Das dritte und vierte Feld stellen die lokale Verortung zum Zentralpixel dar: `x_coord-1, y_coord-1`

Auf diese Weise kann jeder Wert des Zentralpixels mit seinen Nachbarpixeln verglichen werden. Zentralpixel sind zu Beginn nur Seedpixel (= Pixel in einer Anrisszone), später werden auch bereits zur Region hinzugefügte Pixel zu Zentralpixeln. Ein Pixel kann also nur hinzugefügt werden, wenn bereits ein Pixel aus der Nachbarschaft zur Region dazugehört.

Von den verwendeten Parametern können einige bereits von den Inputdaten übernommen werden (absolute Neigung und Rauigkeit), andere müssen zuerst noch generiert werden. Bei der relativen Neigungs- sowie Expositionsänderung geschieht dies durch Einbeziehen der Nachbarschaft, während die erlaubte Spannweite der Exposition anders berechnet wird.

```
# check if gradient change is larger than threshold and if gradient falls within a certain threshold
if neighbours[i][0] > slope_array[x_coord][y_coord]:
    gradient_change = slope_array[x_coord][y_coord]/neighbours[i][0]
else:
    gradient_change = neighbours[i][0]/slope_array[x_coord][y_coord]

# check if aspect is similar
aspect_change = min(abs(aspect_array[x_coord][y_coord]-neighbours[i][1]), abs(360-abs(aspect_array[x_coord][y_coord]-neighbours[i][1])))
```

Abbildung 4.31: Generierung *gradient\_change* und *aspect\_change*

Das Ähnlichkeitskriterium für die Neigungsänderung stellt ein Verhältnis zwischen der Neigung des Zentralpixels und dem Nachbarpixel dar. Dabei wird immer der kleinere Wert durch den grösseren geteilt. Schmid (2014) erklärt diese Idee mit der Begründung, dass abrupte Neigungsänderungen Hinweise für Kegelgrenzen sind, was in der vorliegenden Arbeit für Hanggrenzen übernommen werden kann. Mit demselben Gedanken wurde der Parameter *aspect\_change* generiert. Zu grosse Expositionsänderungen treten zum Beispiel an Kämmen auf und sollten deshalb vermieden werden. Hier wird die Differenz des Zentralpixels und des Nachbarpixels ermittelt, dafür wird die Funktion `min()` verwendet, sodass diese Berechnung auch der 360°/0°-Grenze standhält (bei einem Schwellenwert von 6° wäre eine Exposition von 358° zu 2° erlaubt, laut normaler Rechnung wäre aber 356° (358° - 2°) ein viel zu grosser Unterschied).

Als schwierigster Parameter stellte sich die erlaubte Spannweite der Exposition heraus. Dafür wurde für jede Anrisszone die Lawinenummer zusammen mit der minimalen und maximalen Exposition, der Spannweite, des Mittelwertes und der Standardabweichung derjenigen eingelesen.

```
# Festlegen des Schwellenwertes, um wie viel Grad die Region von Min und Max der jeweiligen Anrisszone abweichen darf.
asp_schwellenwerte = []
for e in range(len(aspminmax_stdev)):
    range_aspect = 2.5*aspminmax_stdev[e][5]
    if aspminmax_stdev[e][4]-range_aspect >= 0: # Normalfall Minima
        asp_min = aspminmax_stdev[e][4]-range_aspect
    else: # Nordlagen, welche durch zusätzlichen Range unter Null gelangen wuerden.
        asp_min = 360+ (aspminmax_stdev[e][4]-range_aspect)
    if aspminmax_stdev[e][4]+range_aspect < 360: # umgekehrter Problemfall: Maximum + Range wuerde ueber 360 gelangen.
        asp_max = aspminmax_stdev[e][4]+range_aspect
    else:
        asp_max = (aspminmax_stdev[e][4]+range_aspect)-360 # Normalfall Maxima

#erstellen des neuen Array asp_schwellenwerte, welche die verwendeten Grenzwerte pro Anrisszone aufzeigt.
asp_schwellenwerte.append(aspminmax_stdev[e][0])
asp_schwellenwerte.append(asp_min)
asp_schwellenwerte.append(asp_max)
```

Abbildung 4.32: Generierung der erlaubten Spannbreite der Expositionswerte

Mit diesen Werten wurde der erlaubte Bereich für jede Anrisszone in Bezug auf die Expositionsausbreitung festgelegt (Mittelwert – 2.5-mal die Standardabweichung bis Mittelwert + 2.5-mal die Standardabweichung). Pixel dürfen also nur zur Region hinzugefügt werden, wenn jene zwischen diesen beiden Schwellenwerten liegen. Es stellte sich wieder die Problematik mit dem

Übergang von 360° zu 0°, deshalb mussten auch hier Spezialfälle gehandhabt werden. Anschliessend wurden diese Schwellenwerte in einem neuen Array gespeichert, sodass diese weiterverwendet werden konnten.

```
if 30 <= neighbours[i][0] <= 60 and gradient_change > 0.92 and aspect_change < 6 and neighbours[i][2] < 0.5  
and asp_schwellenwerte[k][1] <= neighbours[i][1] <= asp_schwellenwerte[k][2]:
```

#### Abbildung 4.33: Entscheidendes If-Statement

Als finales If-Statement wurden alle Parameter mit deren gesetzten Schwellenwerten beigezogen. Nur Pixel, welche allen diesen Bedingungen standhielten, wurden zur Region hinzugefügt, indem ihnen die Lawinennummer ihres Zentralpixels übergeben wurde. Dies geschah solange, bis keine Pixel mehr zur Region hinzugefügt wurden. Anschliessend wurde der ursprüngliche *inseed\_array* mit den neuen Werten als .txt-Datei gespeichert.

#### (5) Konversion von .txt zu ASCII File

Als letzter Punkt folgt die Umwandlung zurück in eine ASCII-Datei, sodass jene in ArcMap visualisiert werden kann. Dafür wird der neuen Datei der Header der Inputdatei *inseed\_array* übergeben und die neue Datei kann in ArcMap weiter verwendet werden.

## 4.5 Deskriptive Statistik von Anrisszonen und Hängen

In den nächsten Kapiteln folgen die Erklärungen, wie die einzelnen Werte der Parameter ermittelt wurden.

### 4.5.1 Länge und Breite

Zur Ermittlung der Länge und Breite der Anrisszonen wurde die Funktion „Minimum Bounding Geometry MBG“ in ArcMap verwendet. Als Länge wurde in dieser Arbeit allerdings nicht einfach die längere Seite des Rechtecks angeschaut, sondern immer jene in Richtung der Hangneigung.

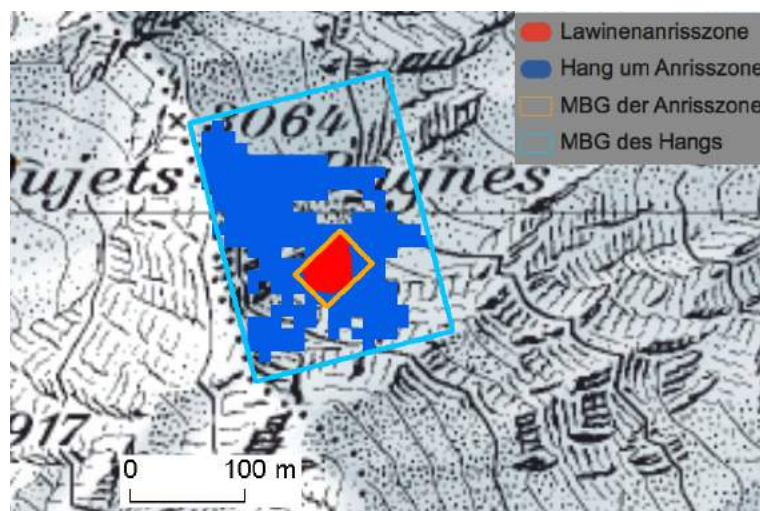


Abbildung 4.34: Methode MBG (Minimum Bounding Geometry)  
Verwendete Daten: Pixelkarte 1:25'000 von Swisstopo

In Abbildung 4.34 ist eine solche MBG für eine Anrisszone und deren zugehörigen Hang abgebildet. Bei der MBG des Hanges tritt nun genau die vorherige Definition in Kraft: Die Länge wird als vertikale Richtung betrachtet und ist folglich hier kleiner als die dazugehörige Breite.

### 4.5.2 Grösse

Da die Breite und Länge der Anrisszonen als auch der Hänge durch die MBG ermittelt wurden und so die eigentliche Grösse der Anrisszone nicht genau wiedergeben, wurde diese mit Hilfe deskriptiver Statistik ebenfalls angeschaut. Dabei handelt es sich um die digitalisierten Anrisszonen (Polygone) sowie die von Rasterform zu Polygon konvertierten Hänge.

### 4.5.3 Neigung

Vontobel (2011) hat in ihrer Arbeit die maximale und die durchschnittliche Hangneigung in Anrisszonen untersucht, indem sie die Hangneigung in drei verschiedenen Zonen (Anriss oben, Anriss Mitte, Anriss unten) im Anrissgebiet ermittelte. In der vorliegenden Arbeit wurden nur die maximale und durchschnittliche Hangneigung pro ganzer Anrisszone berechnet. Zusätzlich wurde auch die minimale Neigung einbezogen.

### 4.5.4 Exposition

Für die Auswertung der Exposition wurde hier der jeweilige Mittelwert verwendet. Allerdings tauchte da die Problematik auf, dass eine nördlich gelegene Anrisszone mit Werten von 350° bis 10° einen

Mittelwert um die  $180^\circ$  aufwies und somit die Statistik total verfälschte. Des Weiteren ergaben sich mit der Funktion „Zonal Statistics“ aus ArcMap automatisch Minimalwerte knapp über  $0^\circ$  und Maximalwerte bei  $359^\circ$ . Um diesen beiden Problemen entgegenzuwirken, wurde das Conditional-Statement in ArcMap für die Umrechnung der Exposition verwendet:

$\text{Con}(\text{Aspect} < 180, \text{Aspect} + 360, \text{Aspect})$

Für Werte kleiner als  $180^\circ$  wurden diese also mit  $360^\circ$  summiert, sodass im Norden kein Nullpunkt mehr zu finden war. Anschliessend an die Verwendung des Werkzeuges „Zonal Statistics“ wurden für Werte grösser als 360 diese 360 wieder abgezogen, sodass die korrekten Mittelwerte, Minima und Maxima gefunden werden konnten. Diese Methode wurde aber natürlich nur bei Anrisszonen an Nordhängen verwendet. An Südhängen zeigt sich diese Problematik nicht.

#### 4.5.5 Krümmung

Die Krümmung setzt sich aus zwei verschiedenen Komponenten zusammen: Profil- sowie Plankrümmung. Die Plankrümmung beschreibt die Horizontalkrümmung, also die Krümmung der Oberfläche rechtwinklig zur Neigungsrichtung, während die Profilkrümmung die Vertikalkrümmung, also die Krümmung der Oberfläche in Neigungsrichtung ergibt (Esri, 2012d).

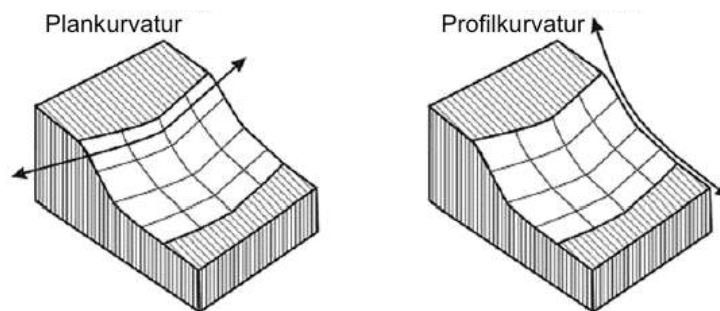


Abbildung 4.35: Plankrümmung vs. Profilkrümmung (Harrison et al., 2008)

Für die Zuteilung der Anrisszonen und Hänge zur passenden Geländeform nach Dikau (1989) wurde der Mittelwert jeder Anrisszone/jedes Hanges verwendet. Dikaus Einteilung in neun Klassen ist der folgenden Abbildung zu entnehmen:

		Plankrümmung		
		konvex	gerade	konkav
Profilkrümmung	konvex	xx/kx	kx/g	kx/kv
	gerade	g/kx	g/g	g/kv
	konkav	kv/kx	kv/g	kv/kv

Abbildung 4.36: Die neun Geländeformen nach Dikau (1989), Grafik nach Vontobel (2011)



Für die vorliegende Arbeit mussten vorgängig zwei Entscheidungen getroffen werden: Einerseits die Wahl der Auflösung des DHMs, andererseits die Wahl des Schwellenwertes, was als gerade und was als gekrümmt (ob konkav oder konvex) gilt. Für die Wahl des DHMs wurde die Krümmung für die Auflösung von 2 m, 5 m, 10 m und 25 m berechnet. Bei 2 m werden die kleinsten Unebenheiten mit in die Krümmungsberechnung hineingenommen. Der Zweck der Krümmung hier ist allerdings die allgemeine Tendenz der Hangform zu ermitteln und nicht kleinste Erhebungen und Vertiefungen zu erkennen. Dasselbe gilt ein wenig abgeschwächt bei einer 5 m-Auflösung. Es spielen immer noch relativ kleine Phänomene mit in die Krümmungsberechnung hinein. Bei 10 m werden noch weniger kleinräumige Phänomene mit berücksichtigt, allerdings sind einige Anrisszonen so klein, dass sie nur noch aus wenigen Pixeln bestehen. Dies führt bei einer Auflösung von 25 m zum Problem, dass einige Lawinen durch ein, zwei Pixel Krümmung dargestellt werden würden, andere Anrisszonen aufgrund von zu kleiner Grösse gar nicht mehr bestehen würden. Deshalb wurde als Kompromiss zwischen genügend Werten pro Lawine als auch dem Vermeiden des Einbezugs von zu kleinen lokalen Phänomenen eine Auflösung von 10 m für die Krümmung gewählt.

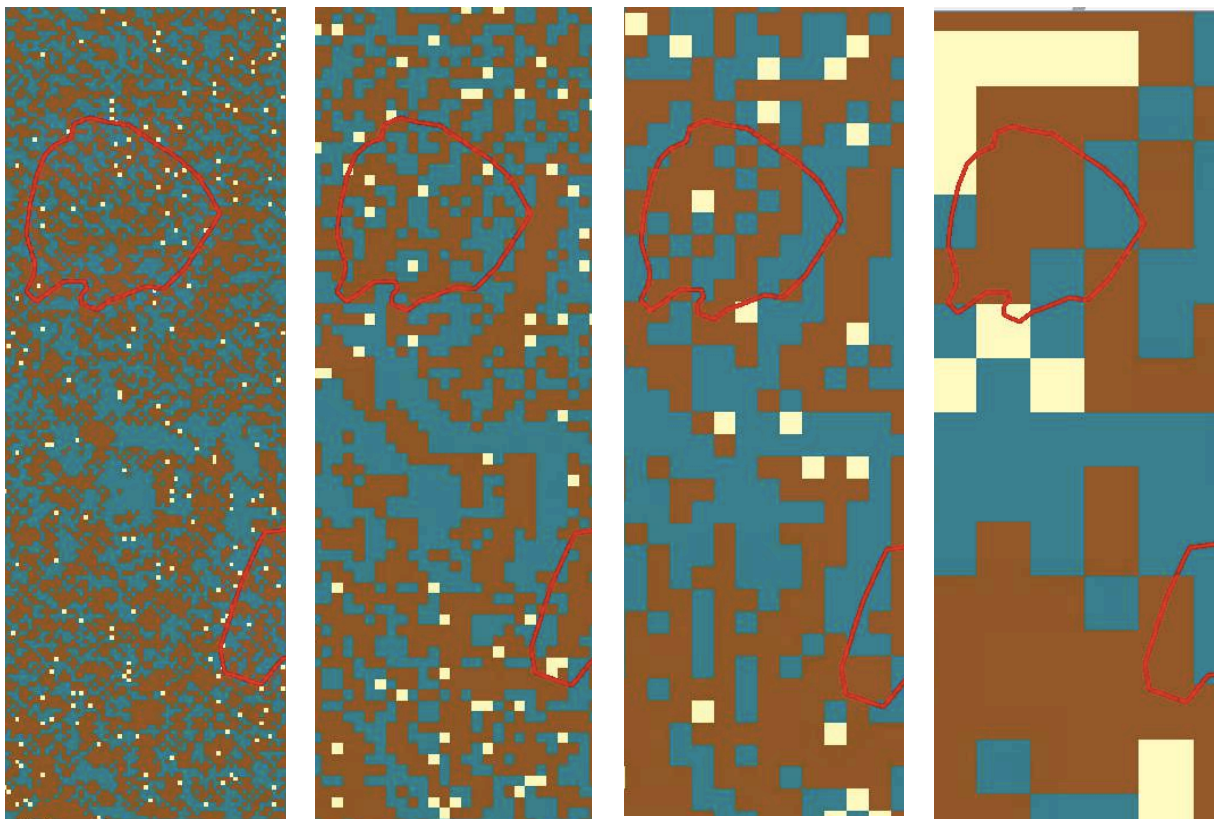


Abbildung 4.37: Krümmung für Auflösungen von 2 m, 5 m, 10 m, 25 m

	Konvexe Gebiete		Gerade Gebiete		Konkave Gebiete
--	-----------------	--	----------------	--	-----------------

Als zweites stand die Wahl des Schwellenwertes an, ab wann ein Gelände als gerade gilt. Vontobel (2011) hat in ihrer Arbeit aufgezeigt, welche Unterschiede sich je nach Wahl dieses Schwellenwertes ergeben. Wie bei ihr wurde in der vorliegenden Arbeit 0.2 respektive -0.2 als Schwellenwert zur Abgrenzung von gerade zu ungerade gewählt. Einerseits dient dies dem einfacheren Vergleich mit Vontobels Werten, andererseits wurde dieser Schwellenwert auch in anderen Arbeiten verwendet (zum Beispiel bei Maggioni & Gruber (2003) und bei Gruber Schmid & Sardemann (2003)).

Vontobel (2011) zeigte je nach Wahl des Schwellenwertes und je nach Auflösung unterschiedliche Resultate auf (siehe Abbildung 4.38).

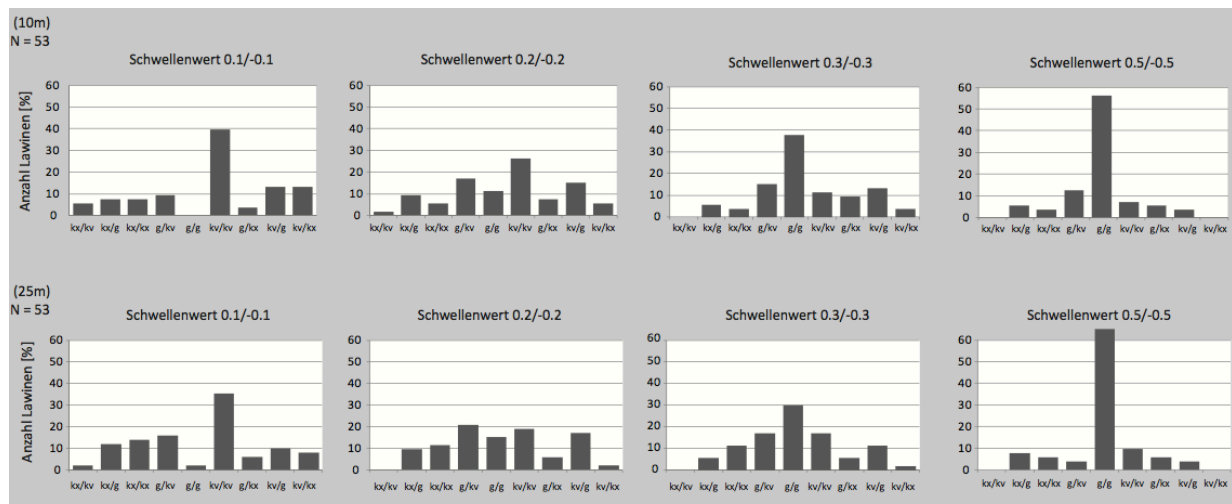


Abbildung 4.38: Häufigkeitsverteilung der Kurvatur je nach Schwellenwert und Auflösung nach Vontobel (2011)

### 4.5.6 Rauigkeit

Die Berechnung der Rauigkeit wurde bereits im Kapitel 4.3.1 ausführlich erläutert. Da die Rauigkeit mehr zum Ausschluss von einigen Gebieten dienen sollte und weniger als beschreibende Variable, wird diese im Kapitel Resultate nur relativ kurz besprochen. Es werden die Maximal- und Durchschnittswerte sowohl in Anrisszonen als auch in den Hängen rundherum aufgezeigt und miteinander verglichen.

## 4.6 Evaluation der erhaltenen Hänge

Die Evaluation der erhaltenen Hänge stellt einen wichtigen Schritt dar. Um die Klassifikationsresultate auszuwerten, muss ein Vergleich mit einer externen Quelle gezogen werden. Diese kann aus früheren Studien, aus der Literatur, aus Feldbegehungen oder aus Gesprächen mit Experten oder Anwohnern stammen. Besteht so ein unabhängiger zweiter Datensatz, kann dieser mit den Resultaten des Region-Growing-Ansatzes mit Hilfe einer Konfusionsmatrix auf Gleichheiten und Unterschiede untersucht werden (Jellema et al., 2009). Als weitere Evaluation von Segmentationstechniken stellt sich das menschliche Auge dar (Baatz & Schäpe, 2000). Durch die automatische Segmentation wird das Digitalisieren von Hand ersetzt. Kein Segmentations-Resultat kann überzeugen, wenn es nicht das menschliche Auge überzeugt. Baatz & Schäpe (2000) haben allerdings Segmentationstechniken für Bilder untersucht, bei welchen die erhaltenen Resultate mit den ursprünglichen Bildern verglichen werden können.

In dieser Arbeit war zu Beginn gedacht, dass wie oben genannt, als externe Quelle selbst kartierte Hänge um die Anrisszonen verwendet werden können. Schnell war aber klar, dass dies nicht der Fall ist, da viele Parameter in der Karte nicht erkennbar sind (wie Hangneigung über 60° und unter 30°). Deshalb wurden drei andere Methoden verwendet, welche alle die Resultate auf ihre Art auswerten.

### 4.6.1 Einfluss der Parameter

Einen grossen Einfluss auf die Resultate der Hänge haben die verschiedenen Parameter. Wie die verschiedenen Schwellenwerte die Ergebnisse beeinflussen, wurde bei der Schwellenwert-Setzung bereits beschrieben (siehe Kapitel 4.3.3). Wie sich allerdings die Parameter generell auf die Region-Growing-Methode auswirken, wurde bis anhin noch nicht untersucht. Deshalb wurde der Algorithmus mehrmals durchgeführt, wobei jedesmal ein anderer Parameter weggelassen wurde. So kann erkannt werden, wie gross die Auswirkungen eines fehlenden Parameters sind. Da bei Neigung und Exposition je zwei Parameter existieren (relativ und absolut sowie relativ und erlaubte Spannbreite), wurde zusätzlich je ein Durchlauf des Codes ohne jede Neigung sowie ohne jede Exposition durchgeführt.

### 4.6.2 Compactness

Mit der Compactness kann eine geometrische Form aufgrund des Verhältnisses von Umfang und Fläche beurteilt werden (Bogaert et al., 2000). Je kleiner der Umfang für eine gegebene Fläche, desto kompakter ist die Form. Als perfekt gilt der Kreis, denn es gibt keine Form, die mit weniger Umfang eine verhältnismässig so grosse Fläche umrahmt.

Diese Compactness wird in dieser Arbeit verwendet, um einerseits den Unterschied der Kompaktheit von Anrisszonen und Hängen zu untersuchen, andererseits um die Hänge selber zu evaluieren.

Normalerweise wird folgende Formel verwendet, wobei A = Area und P = Perimeter bedeutet:

$$Compactness = \frac{A}{P^2}$$



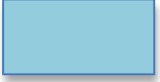
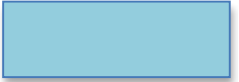

**Formel 4.2: Berechnung der Compactness (Bogaert et al., 2000)**

Da aber der Kreis als perfekt gilt, wurde nun nach Bogaert et al. (2000) die Formel so abgeändert, dass für jeden Kreis die Compactness genau 1 beträgt, alle anderen Formen erzielen Werte zwischen 0 und 1. Es gilt: Je näher an 1, desto kompakter.

$$Compactness_{Kreis} = \frac{2\sqrt{(\pi \cdot A)}}{P}$$

**Formel 4.3: Abgeänderte Berechnung der Compactness (Bogaert et al., 2000)**

Zur Veranschaulichung werden hier einige Beispiele angeführt (P = Perimeter, A = Area, r = Radius):

Kreis		
	Für r = 1 mit $P = 2 * \pi * r$ und $A = \pi * r^2$ P = 6.28; A = 3.14 Compactness = <b>1.0</b>	Für r = 20 P = 125.66; A = 1256.64 Compactness = <b>1.0</b>
Quadrat		
	1 * 1 P = 4; A = 1 Compactness = <b>0.89</b>	20 * 20 P = 80; A = 400 Compactness = <b>0.89</b>
Rechteck mit Seitenverhältnis 1:2		
	1 * 2 P = 6; A = 2 Compactness = <b>0.84</b>	20 * 40 P = 120; A = 800 Compactness = <b>0.84</b>
Rechteck mit Seitenverhältnis 1:3		
	1 * 3 P = 8; A = 3 Compactness = <b>0.77</b>	20 * 60 P = 160; A = 1200 Compactness = <b>0.77</b>
Rechteck mit Seitenverhältnis 1:10		
	0.3 * 3 P = 6.6; A = 0.9 Compactness = <b>0.51</b>	20 * 200 P = 440; A = 4000 Compactness = <b>0.51</b>

**Tabelle 4.3: Compactness-Werte für verschiedene Geometrien**

Der Kreis mit dem Compactness-Wert 1 gilt als perfekt. In Tabelle 4.3 ist klar zu erkennen, dass je schmäler und länger eine Form ist, desto tiefere Werte weist die Geometrie auf. Dabei spielt allerdings nur das Verhältnis der Seitenlängen eine Rolle, die absolute Grösse hat keinen Einfluss auf die Compactness. Im Kapitel 5.2.2 werden die Werte der Compactness für Anrisszonen als auch für die Hänge aufgezeigt.

Diese Kompaktheit basiert auf den Polygonen der Anrisszonen und Hänge. Folglich mussten dafür die Raster der Hänge zu Polygonen konvertiert werden (wie bereits für die Grösse unter 4.5.2).

### 4.6.3 Subjektive Beurteilung

Durch subjektive Beurteilung sollte die Ausdehnung der Hänge evaluiert werden. Dafür wurden die Resultate in drei Klassen eingeteilt: gut (g), mittel (m) oder schlecht (s). Die entscheidenden Kriterien waren folgende:

- Stellt der Hang eine kompakte Form dar, egal ob rund oder länglich? (wenn ja → gut)
- Sind viele Einbuchtungen vorhanden? (wenn ja → schlecht)
- Hängen grosse Hang-Partien von einzelnen Pixeln ab? (wenn ja → schlecht)

Die erwarteten Resultate werden sich vermutlich nicht massiv von den Compactness-Werten unterscheiden, welche im vorherigen Kapitel beschrieben wurden. Der einzige Unterschied ist, dass bei dieser subjektiven Beurteilung längliche Formen, solange einigermaßen kompakt, nicht automatisch als schlecht angesehen werden. Es folgen Beispiele aus den drei Klassen:

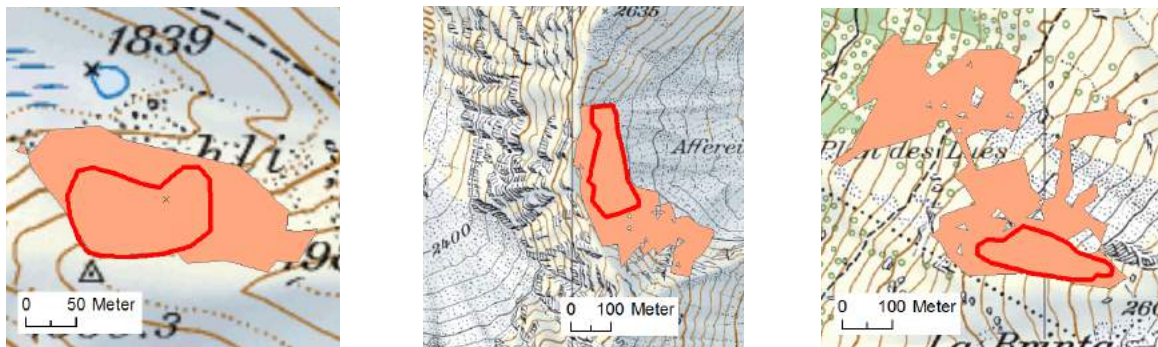


Abbildung 4.39: Subjektive Beurteilung der Hänge: Beispiele für gut, mittel und schlecht (v.l.n.r.)  
Verwendete Daten: Pixelkarte 1:25'000 von Swisstopo

Im Kapitel 5.2.3, wo die entsprechenden Resultate aufgezeigt werden, erfolgt auch ein Vergleich zwischen der objektiven Compactness und der subjektiven Beurteilung.

## 4.7 Zusammenhänge mit Werten aus der SLDB

Es soll geprüft werden, ob Korrelationen bestehen zwischen den bereits vorhandenen Daten aus der SLDB und den in dieser Arbeit ermittelten Hängen. Dazu wurde jeweils das Verhältnis von Anriss- zu Hangbreite oder Anriss- zu Hanggrösse ermittelt und in Beziehung zur überprüfenden Variable gesetzt. Zum Vergleich wurden die verwendeten Korrelationsanalysen immer auch noch im Zusammenhang mit den Werten der Anrisszonen allein durchgeführt.

Zuerst wurde jeweils die Beziehung der zwei Variablen geplottet. Anschliessend musste für die Korrelationsanalyse getestet werden, ob die Daten normalverteilt sind. Dies erfolgte mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test. Herrscht Normalverteilung, folgt die Korrelationsanalyse nach Pearson. Sind die Daten nicht normalverteilt, wird die Korrelationsanalyse nach Spearman durchgeführt. Danach wird für das festgelegte Signifikanzniveau von  $\alpha = 0.05$  entschieden, ob die aufgestellte Nullhypothese angenommen oder abgelehnt wird. Als Nullhypothese für die Korrelationsanalyse gilt immer folgende:

Es besteht keine Korrelation in der Grundgesamtheit ( $r = 0$ ).

Wird die Nullhypothese mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5% abgelehnt, was besagt, dass ein signifikanter Zusammenhang zwischen den beiden Variablen besteht, kann das  $r$  (= Korrelationskoeffizient) als Stärke des Zusammenhangs interpretiert werden.

Es gilt wie folgt (Kaiser, 2012):

- $r < 0 \rightarrow$  negativer Zusammenhang
- $r > 0 \rightarrow$  positiver Zusammenhang
- $r = 0 \rightarrow$  kein linearer Zusammenhang

Interpretation des Korrelationskoeffizienten (Kaiser, 2012):

- $0.0 \leq |r| \leq 0.2 \rightarrow$  keine/geringe Korrelation
- $0.2 \leq |r| \leq 0.5 \rightarrow$  schwache/mässige Korrelation
- $0.5 \leq |r| \leq 0.8 \rightarrow$  Korrelation
- $0.8 \leq |r| \leq 1.0 \rightarrow$  hohe/perfekte Korrelation

In einem ersten Schritt wurden mögliche Zusammenhänge von einzelnen Variablen aus der SLDB mit der Anrissbreite sowie dem Verhältnis Anriss-/Hangbreite als auch mit der Anrissgrösse sowie dem Verhältnis Anriss-/Hanggrösse getestet.

In einem zweiten Schritt wurde versucht durch mehrere unabhängige Variablen (wie Anrissmächtigkeit, die Neigung in der Anrisszone (Werte aus den hier verwendeten Anrisszonen und nicht aus der SLDB), die Gefahrenstufe und die Auslöseart) einerseits das Verhältnis von Anriss- zu Hangbreite als auch das Verhältnis von Anriss- zu Hanggrösse zu beschreiben. Dafür wurde die Regressionsanalyse verwendet.

### 4.7.1 Anrissmächtigkeit

In der SLDB existieren Mittelwerte der Anrissmächtigkeit sowie Maximalwerte derselben. Zuerst wurden mögliche Zusammenhänge zu den Mittelwerten getestet, anschliessend folgten Korrelationsanalysen mit den Maximalwerten der Anrissmächtigkeit.

Von den in dieser Arbeit verwendeten Anrisszonen weisen 149 Lawinen in der SLDB Daten zum Mittelwert der Anrissmächtigkeit auf. Diese variieren von 15 cm bis 250 cm. Der Median beträgt 50 cm, der Mittelwert 56.48 cm.

Die Maximalwerte der Anrissmächtigkeit sind bei 133 von 172 Anrisszonen angegeben. Diese variieren von 30 cm bis 400 cm. Der Median dieses Datensatzes beträgt 90 cm, der Mittelwert 98.43 cm.

#### 4.7.2 Gefahrenstufen

Es stellt sich die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen der Gefahrenstufe und der Grösse oder Breite von Anrisszonen besteht. Auch sollten die Daten auf einen möglichen Zusammenhang zwischen der Gefahrenstufe und dem Verhältnis von Anriss- zu Hangbreite oder dem Verhältnis von Anriss- zu Hanggrösse untersucht werden. Wie in Kapitel 2.1.2 erklärt, existieren Gefahrenstufen von 1 bis 5. Bei 168 von 172 Lawinenereignissen sind die Gefahrenstufen pro Lawine in der SLDB aufgelistet. Die Zuteilung der Lawinen zu den Gefahrenstufen sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Gefahrenstufe	Anzahl Anrisszonen	Prozentual [%]
1	5	3.0
2	59	35.1
3	103	61.3
4	1	0.6
5	0	0.0

Tabelle 4.4: Anzahl Anrisszonen bezüglich Gefahrenstufen laut SLDB

Wie bereits in Kapitel 2.1.2 thematisiert, weist die Stufe 3 weitaus am meisten Unfalllawinen auf.

#### 4.7.3 Auslöseart

Es wird der Frage nachgegangen, ob die Auslöseart einen signifikanten Zusammenhang mit der Breite/Grösse der Anrisszonen als auch dem Verhältnis von Anriss- zu Hangbreite oder Anriss- zu Hanggrösse aufweist. 161 der 172 Anrisszonen weisen die Information über die Auslöseart in der SLDB auf. Bei den hier verwendeten Anrisszonen sind genannt: Bergsteiger, Pistenfahrzeuge, Ski, Ski/Snowboard, Snowboard, Schneeschuhe, natürliche Lawinen sowie unsichere Zuteilung zu einer Klasse. Die Zuteilung der Anrisszonen zu einer Auslöseart wurde bereits in Abbildung 3.2 thematisiert.

#### 4.7.4 Multiple Regression

Es soll untersucht werden, ob das Verhältnis von Anriss zu Hang (Breite wie auch Grösse) durch mehrere unabhängige Variablen beschrieben werden kann. Da auch Variablen eingesetzt werden sollen, die nur nominale Daten aufweisen, müssen diese zuerst zu sogenannten Dummy-Variablen abgeändert werden. Als solche Dummy-Variablen werden einerseits die Gefahrenstufe jeder Lawine als auch deren Auslöseart verwendet.

Insgesamt soll untersucht werden, ob das Verhältnis von (1) Anrissbreite zu Hangbreite oder (2) Anrissgrösse zu Hanggrösse durch die unabhängigen Variablen (a) Anrissmächtigkeit und (b) Neigung der Anrisszone (Werte aus den hier verwendeten Anrisszonen und nicht aus der SLDB) und (c) Gefahrenstufe sowie (d) Auslöseart oder eine Teilmenge davon beschrieben werden kann.

Dazu wird eine multiple Regressionsanalyse durchgeführt. Weisen die Residuen dieser Regressionsanalyse keine Normalverteilung auf, kann eine Transformation der Variablen vorgenommen werden, welche üblicherweise die Residuenanalyse verbessert, um so zu einem besser angepassten Modell zu kommen (Stahel, 2013). Folgende Transformationen nach J. W. Tukey können verwendet werden:

Als nützlich erweisen sich sehr oft

- die Logarithmus-Transformation für **Konzentrationen und Beträge** – also für stetige Zufallsvariable, die nur positive Werte haben können –
- die Wurzeltransformation für **Zählraten** und
- die so genannte Arcus-Sinus-Transformation  $\tilde{y} = \arcsin \sqrt{y}$  für **Anteile** (Prozentzahlen/100).

Diese Transformationen haben von J. W. Tukey den Namen **first aid transformations** erhalten und **sollten für solche Daten immer angewendet werden**, wenn es keine Gegen Gründe gibt – und zwar auch für Eingangs-Variable.

Abbildung 4.40: Transformationen nach Tukey (Stahel, 2013)

Für die hier verwendeten Daten bedeutet dies folgende Transformationen:

- (1) Verhältnis Anriss- zu Hangbreite und (2) Anriss- zu Hanggrösse: ArcSin-Transformation  
 (a) Anrissmächtigkeit sowie (b) Neigung der Anrisszone: Log-Transformation  
 (c) Gefahrenstufe und (d) Auslöseart: keine Transformation nötig, diese bleiben als Dummy-Variablen bestehen.

Anschliessend können erneut Regressionsanalysen mit den transformierten Variablen durchgeführt werden.



## 5 Resultate

In den folgenden Kapiteln werden zuerst die Eigenschaften der Anrisszonen und ihrer Hänge besprochen, anschliessend erfolgt die Evaluation der erhaltenen Hänge und zum Schluss werden Resultate zu möglichen Zusammenhängen zwischen den generierten Daten und jenen der SLDB gezeigt.

### 5.1 Eigenschaften von Anrisszonen und ihren Hängen

In diesem Kapitel folgt die deskriptive Auswertung der untersuchten Anrisszonen und der durch den Algorithmus erhaltenen Hänge. Es ist zu erwähnen, dass nicht alle Pixel der Anrisszonen den Schwellenwerten des Algorithmus standgehalten hätten. Folglich weisen die Anrisszonen Werte auf, die laut Schwellenwerten nicht erlaubt wären. Da die Anrisszone immer als Ausgangslage zur Ermittlung der Hänge diente, werden also diese „fälschen“ Werte auch in den Ergebnissen der Hänge widerspiegelt. Ausserhalb der Anrisszone treffen aber alle Werte auf die gesetzten Schwellenwerte zu.

Als weitere Anmerkung gilt: Es existieren Anrisszonen, die so nahe beieinander liegen, dass sie sich gegenseitig bei der Hangermittlung beeinflussen. Diese wurden einzeln angeschaut, sodass sie sich optimal ausbreiten konnten.

Vontobel (2011) hat in ihrer Arbeit Lawinenumrisse und deren Anrisszonen untersucht. Die in der hier vorliegenden Arbeit behandelten Anrisszonen wurden deshalb mit Vontobels Ergebnissen zu Anrisszonen verglichen, während ihre Ergebnisse zu den gesamten Lawinenumrissen ausser Acht gelassen wurden.

#### 5.1.1 Länge und Breite

Im Folgenden wurden Länge und Breite der Anrisszonen sowie ihrer zugehörigen Hänge ermittelt und anschliessend im Vergleich analysiert. Zu bedenken ist allerdings, dass diese Methode mittels MBG die Luftdistanz verwendet und nicht die reale Länge und Breite der Anrisszonen im Gelände wiedergibt. Für genauere Ergebnisse müsste folglich das Gelände berücksichtigt werden.

#### **Anrisszonen**

Die in dieser Arbeit verwendeten Anrisszonen weisen Breiten von 7.56 m bis 1000.98 m und Längen von 10.68 m bis 536.84 m auf. Während bei Vontobel (2011) die Hälfte der Anrisszonen eine Breite von unter 65 m und eine Länge von unter 85 m aufweist, weisen bei den in dieser Arbeit verwendeten Anrisszonen die Hälfte eine Breite kleiner als 73 m und eine Länge kleiner als 77 m auf. Der Mittelwert der Breite beträgt 99.84 m, jener der Länge 107.57 m. Bei beiden Variablen ist der Median kleiner als der Mittelwert, folglich sind die Daten rechtsschief verteilt.

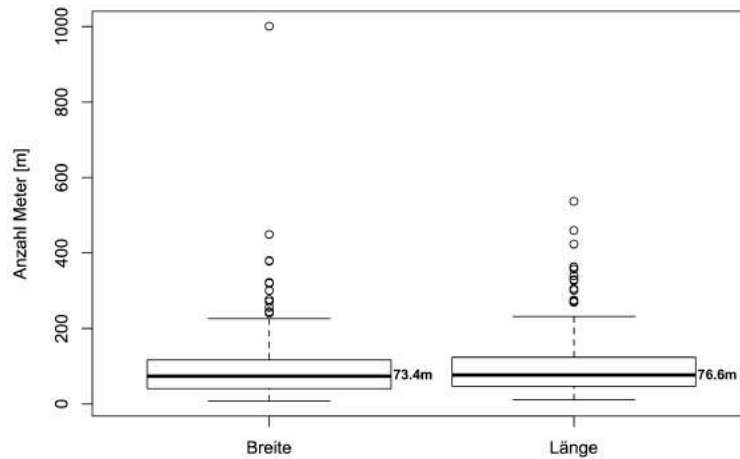


Abbildung 5.1: Boxplot zur Länge und Breite von Anrisszonen

Laut Definition nach Vontobel (2011) verläuft die Länge wie in der vorliegenden Arbeit in die vertikale Richtung, egal ob dieser Wert grösser oder kleiner als die zugehörige Breite ausfällt. Deshalb ist der Unterschied zwischen ihren Medianen von Länge und Breite zu den hier ermittelten Medianen nicht auf die Definition der Länge zurückzuführen. Offenbar wird der Unterschied durch das hier viel grössere Untersuchungsgebiet und folglich mehr Anrisszonen erzeugt.

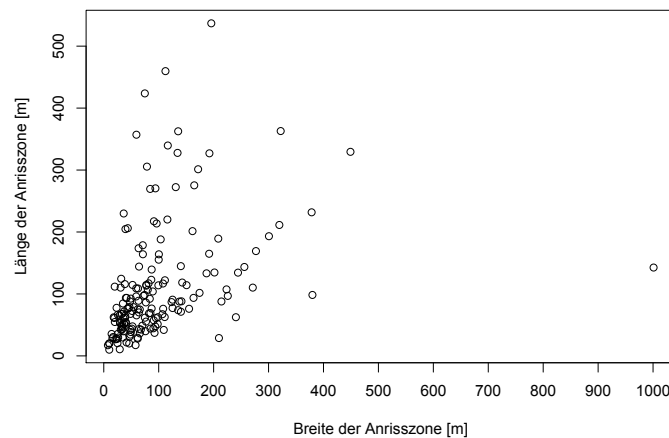


Abbildung 5.2: Länge vs. Breite der Anrisszonen

In Abbildung 5.2 sind die verschiedenen Breiten und Längen der Anrisszonen geplottet. Es ist zu erwähnen, dass 43.6% der untersuchten Anrisszonen breiter sind als sie lang sind. Zwischen der Breite und Länge ist wie in Tabelle 5.1 zu sehen, ein signifikanter Zusammenhang erkennbar. Ein Korrelationskoeffizient von 0.591 stellt eine Korrelation fest.

Test nach Spearman (N = 172)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Anrissbreite – Anrisslänge	0.000	0.591

Tabelle 5.1: Korrelationsanalyse Anrissbreite - Anrisslänge

Wie bei Vontobel weisen über 60% der Anrisszonen (in dieser Arbeit hier 63%) eine Differenz zwischen Breite und Länge kleiner als 50 m auf. Auffällig am abgebildeten Plot ist, dass eine einzige Anrisszone eine riesige Breite aufweist (1000.98 m). Dabei handelt es sich um keinen Fehler, sondern wirklich um eine extrem breite Anrisszone. Dies wurde auf Richtigkeit überprüft mit Hilfe der SLDB. Dort beträgt die Breite der Anrisszone allerdings nur 900 m. 52.3% der Werte konzentrieren sich in der Ecke links unten im Bereich wo Länge und Breite kleiner als 100 m sind.

In der Schadenlawinendatenbank (SLDB) des SLF in Davos sind die jeweiligen Anrissbreiten aufgelistet, die zugehörigen Anrisslängen allerdings nicht. Die durch die Minimum-Bounding-Geometry-Funktion ermittelten Breiten wurden mit jenen aus der SLDB verglichen (siehe Abbildung 5.3).

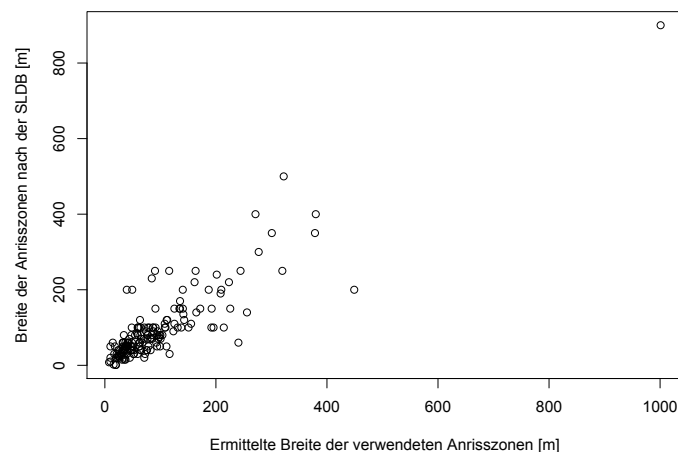


Abbildung 5.3: Breite der Anrisszonen der SLDB vs. ermittelte Breite

Ideal würde das Resultat ausfallen, wenn nun alle Punkte auf der Diagonalen liegen würden, was identische Breite der Anrisszonen sowohl in der SLDB wie in dieser Arbeit hier bedeuten würde. In Abbildung 5.4 wird die Verteilung der Unterschiede der Werte aufgezeigt. Anhand der grünen Dichtekurve ist zu erkennen, dass viele Anrisszonen nur kleine Unterschiede in der Breite aufweisen, während grössere Differenzen nur sehr selten auftreten. In der ersten Klasse (0 bis 50) liegen 84.5% aller Werte. 30.4% weisen sogar kleinere Differenzen als 10 m, 52.4% Differenzen kleiner als 20 m, 69.6% Unterschiede kleiner als 30 m und 77.4% Abweichungen kleiner als 40 m auf.

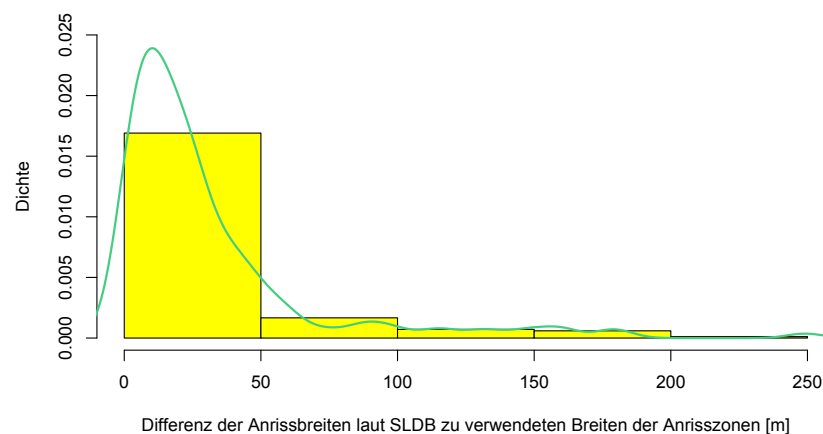


Abbildung 5.4: Verteilung der Differenz (Betrag) der unterschiedlichen Anrissbreiten

## Hänge

Die in dieser Arbeit ermittelten Hänge rund um die Anrisszonen weisen Breiten von 10.81 m bis 1525.95 m und Längen von 12.66 m bis 1132.62 m auf. Die Hälfte aller Breiten ist kleiner als 172.4 m, während die Hälfte aller Längen kleiner als 157.5 m ist. Von diesen Hängen sind 52.9% breiter als sie lang sind.

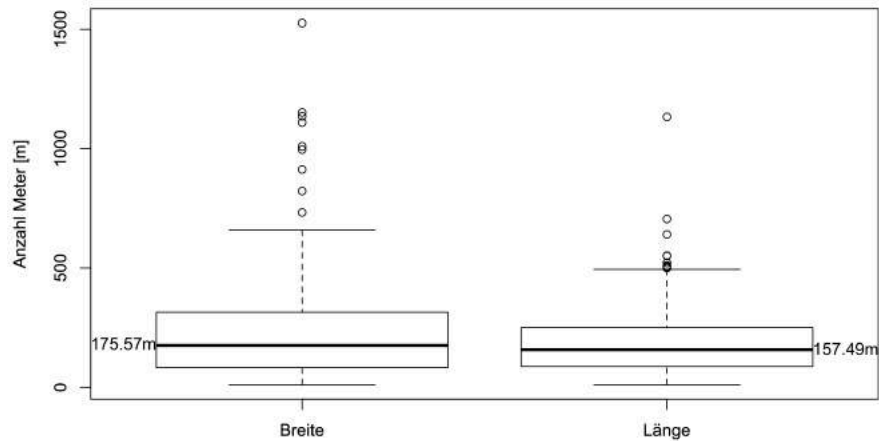


Abbildung 5.5: Boxplot zur Breite und Länge von Hängen

Bei den entstandenen Hängen rund um die Anrisszonen weist die Breite nun insgesamt höhere Werte auf als die Länge. Folglich sind die Regionen um die Anrisszonen mehr in die Breite als in die Länge gewachsen.

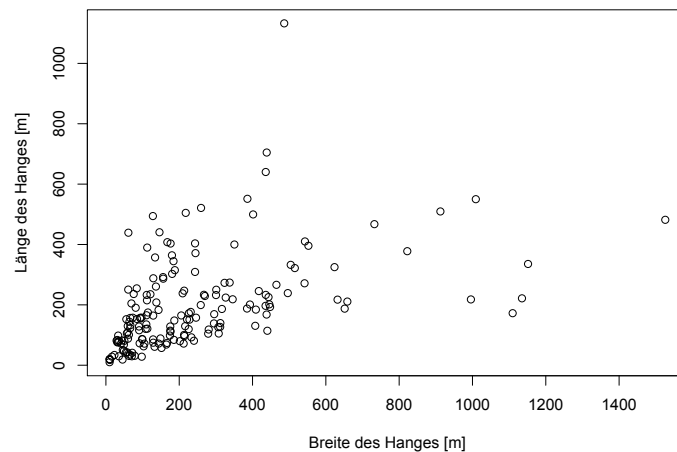


Abbildung 5.6: Länge des Hanges vs. Breite des Hanges

Natürlich hängen diese Werte stark mit der Wahl der Schwellenwerte zusammen: Lässt der Schwellenwert bei der Expositionsänderung mehr Variation zu als jener bei der Neigungsänderung, breitet sich ein Hang in horizontaler Richtung mehr und in vertikaler Richtung weniger aus. Hier das Gleichgewicht zu finden, dass sich Hänge sowohl in vertikale als auch horizontale Richtung etwa gleich ausbreiten können, stellte eine Herausforderung dar. Im Kapitel 4.3.3 ist die Wahl der Schwellenwerte erläutert.

## Vergleich Anrisszonen - Hänge

In 97.1% der Fälle haben die Hänge rund um Anrisszonen an Länge und/oder Breite zugenommen, was ja auch Sinn und Zweck des erarbeiteten Algorithmus war. In den anderen 2.9% der Anrisszonen

weisen die Hänge genau dieselbe Länge und Breite auf wie ihre Anrisszone. Diese fünf Hänge sind aufgrund der Schwellenwertsetzung nicht gewachsen. 4.1% der Hänge weisen exakt die gleiche Breite und 6.4% genau dieselbe Länge wie ihre Anrisszonen auf.

Beim Vergleich von Anrisszonen und Hängen fällt auf, dass bei ersteren der Median der Breite kleiner ausfällt als jener der Länge. Bei den Hängen ist es genau umgekehrt: Die Breite weist höhere Werte auf als die Länge. Folglich wurden durch den Algorithmus die Daten so verändert, dass sich die Anrisszonen vor allem in die Breite ausgedehnt haben.

In Abbildung 5.7 fällt auf, dass in den Bereichen links von der blau-gestrichelten Linie keine Werte liegen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Anrisszonen als Ausgangslage für die Extraktion der Hänge dienen und folglich die Hänge mindestens so hohe Werte pro Länge und Breite wie ihre zugehörigen Anrisszonen aufweisen.

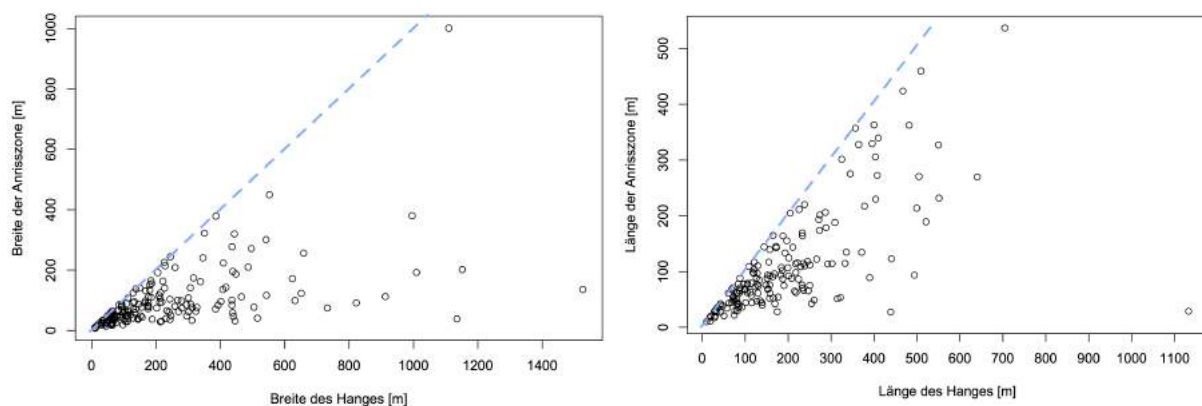


Abbildung 5.7: Vergleich Breite und Länge der Anrisszonen mit jenen der Hänge

Mit der Korrelationsanalyse wurden je Breite und Länge der Anrisszonen und Hänge auf Zusammenhänge getestet, bei beiden Wertepaaren besteht eine signifikante Korrelation mit je hohen Korrelationskoeffizienten (vergleiche Tabelle 5.2).

Test nach Spearman (N = 172)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Anrissbreite – Hangbreite	0.000	0.707
Anrisslänge – Hanglänge	0.000	0.754

Tabelle 5.2: Korrelationsanalyse Anrissbreite – Hangbreite / Anrisslänge - Hanglänge

Allerdings hängt der so hohe Korrelationskoeffizient auch mit der Ausgangslage, dass der Hang mindestens den Wertebereich der Anrisszone beinhaltet, zusammen. Die hohen Werte sind also mit Vorsicht zu genießen.

Das Verhältnis von Anrissbreite zu Hangbreite gibt Auskunft darüber, wie stark die einzelnen Anrisszonen die ermittelte Breite des möglichen Hanges rundherum ausgenutzt haben. Werte treten von 0.034 bis 1 auf. Der Mittelwert (0.522) und der Median (0.508) der Daten liegen ziemlich genau in der Mitte der möglichen Spannweite. Bei einem Lawinenanriss mit einem Verhältnis von 1 ist das Maximum an möglicher Hangbreite genutzt. Wegen markanter Änderungen in der Geländeform oder

aber aufgrund der erlaubten Expositionsspannweite war eine Ausbreitung des Hanges beim Region-Growing rund um die Anrisszone nicht oder nur bedingt möglich. Bei Ergebnissen nahe bei 0 haben die Anrisszonen überraschend viel Spielraum der möglichen Hangbreite nicht ausgenutzt. Für die riesigen Unterschiede zwischen Anriss- und Hangbreiten lassen sich aufgrund der verwendeten Geländeparameter keine Gründe finden. Sie sind dementsprechend wohl im Wetter oder in den Eigenschaften der Schneedecke zu suchen.

### 5.1.2 Grösse

Da Länge und Breite durch die Funktion MBG ermittelt wurden, widerspiegeln diese nicht exakt die eigentliche Grösse der Anrisszonen und ihrer Hänge. Deshalb wird jene in diesem Kapitel genauer angeschaut. Dafür wurden die Anrisszonen und Hänge beide in Vektorform verwendet.

#### Anrisszonen

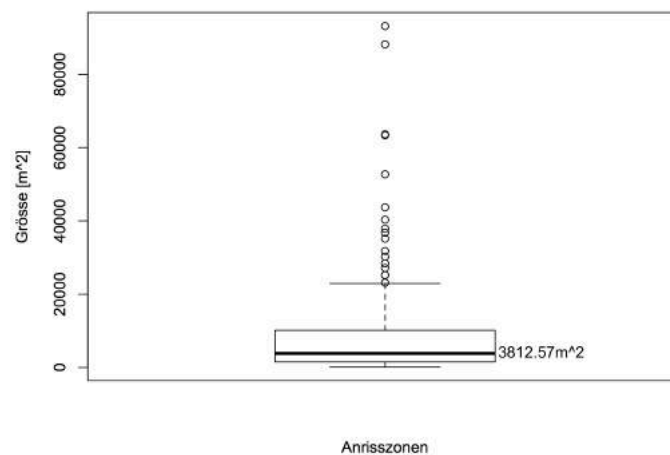


Abbildung 5.8: Boxplot zur Grösse von Anrisszonen

Die Grössen der Anrisszonen variieren von 114.58 m<sup>2</sup> bis 93'161.17 m<sup>2</sup>. Der Mittelwert ist um einiges grösser als der Median, er beträgt 9183.56 m<sup>2</sup>.

#### Hänge

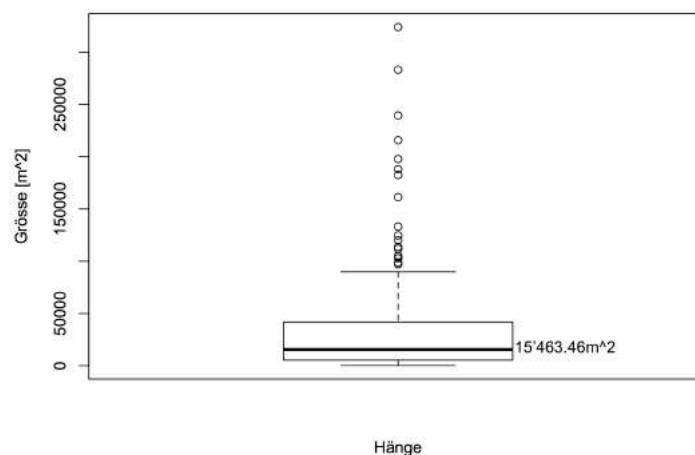


Abbildung 5.9: Boxplot zur Grösse von Hängen

Bei den Hängen rund um die Anrisszonen treten Grössen von 114.58 m<sup>2</sup> bis 324'021.09 m<sup>2</sup> auf. Der Mittelwert beträgt 34'824.21 m<sup>2</sup> und ist damit mehr als doppelt so hoch wie der Median des Datensatzes.

**Vergleich Anrisszonen - Hänge**

Es ist bei den Anrisszonen als auch bei den Hängen klar zu erkennen, dass beide Datensätze Rechtsschiefe aufweisen. Der Minimalwert ist in beiden Datensätzen der gleiche, dabei handelt es sich um die kleinste Anrisszone, bei welcher die Region durch die Festsetzung der Schwellenwerte im Algorithmus nicht wachsen konnte.

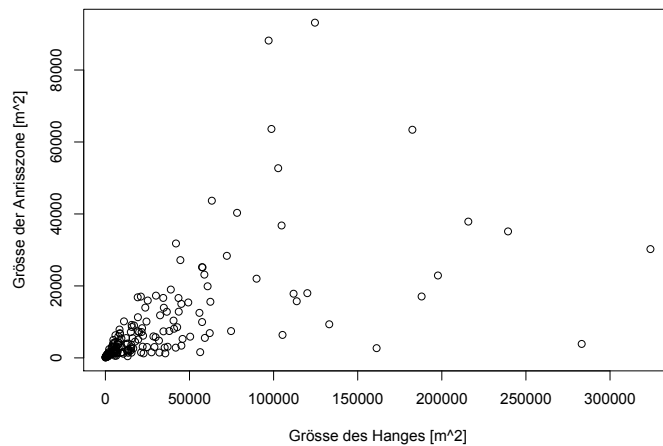


Abbildung 5.10: Grösse der Anrisszone vs. Grösse des Hanges

In Abbildung 5.10 ist ausserdem ein Zusammenhang der Daten zu vermuten, welcher geprüft wurde und nun in Tabelle 5.3 erkannt werden kann. Auch da gilt allerdings Vorsicht betreffend dem sehr hohen Korrelationskoeffizienten, da die Hanggrösse jene der Anrissgrösse voraussetzt.

Test nach Spearman (N = 172)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Anrissgrösse – Hanggrösse	0.000	0.804

Tabelle 5.3: Korrelationsanalyse Anrissgrösse - Hanggrösse

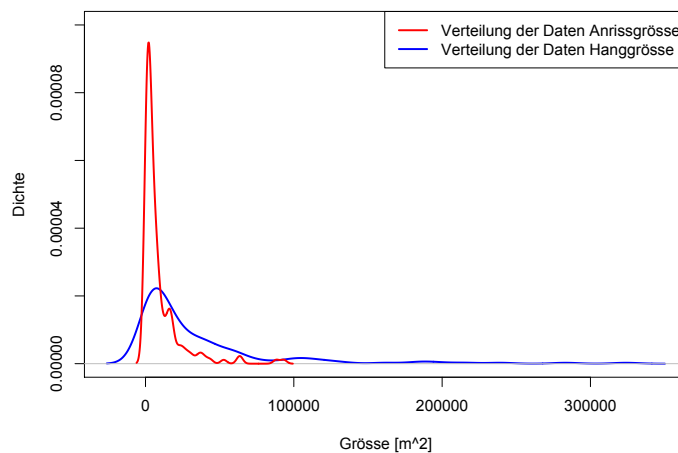


Abbildung 5.11: Werteverteilung der Grösse bei Anrisszonen und Hängen

In Abbildung 5.11 sind die Werteverteilungen der beiden Datensätze zum Vergleich aufgezeigt. In dieser Abbildung ist zu erkennen, wie viel die Hänge durch den Region-Growing-Ansatz an Grösse zugelegt haben. Die Spannweite der Grössenzunahme erstreckt sich von 0 m<sup>2</sup> bis 293'788.9 m<sup>2</sup>. Die Nullwerte stehen für jene Hänge, welche sich nicht ausgebreitet haben. Bei der flächenmässig grössten Zunahme stieg die Grösse der Anrisszone (30'232.19 m<sup>2</sup>) auf 324'021.09 m<sup>2</sup> als Hang an. Wird die Grösse des Hanges durch jene der Anrisszone geteilt, resultiert der Faktor der Grössenzunahme. Dieser variiert von 1 (gleichgebliebene Grösse) bis 72.98 (massive Grössenzunahme einer mittelgrossen Anrisszone). Zweitere Zahl ist aber ein extremer Ausreisser, 87.8% der Anrisszonen weisen Faktoren unter 10 auf.

Umgekehrt kann auch das Verhältnis Anriss- zu Hanggrösse untersucht werden, wobei Werte von 0.014 bis 1, mit dem Mittelwert 0.403 und dem Median 0.341, auftreten. Die Interpretation dieser Werte erfolgt analog zum oben genannten Verhältnis von Anriss- zu Hangbreite (siehe Kapitel 5.1.1).

### 5.1.3 Neigung

#### Anrisszonen

Die behandelten Anrisszonen weisen bei einer Auflösung von 10 m eine maximale Hangneigung von 27° bis 65° (bei Vontobel (2011) 30° bis 60°) auf, der Durchschnitt der einzelnen Anrisszonen variiert von 20° bis 50° (bei Vontobel (2011) 25° bis 45°). Die Minimalwerte treten von 2° bis 44° auf, was erstaunlich ist, da keine so tiefen Werte erwartet wurden. Dies wird im Kapitel Diskussion unter 6.1 genauer thematisiert.

Die Box des Boxplots in Abbildung 5.12 bei der durchschnittlichen Hangneigung bei Anrissgebieten umfasst Werte von 32.6° bis 38.0°, was ziemlich genau der Verteilung der durchschnittlichen Hangneigung von Anrisszonen bei Vontobel (2011) entspricht (33° bis 38°). Ihrer Meinung nach stellt dies eine steile bis sehr steile Hangneigung dar. Ihre Standardabweichung beträgt im Mittel 2.8°, während sich in der vorliegenden Arbeit der Durchschnitt der Standardabweichung auf 3.8° beläuft. Dadurch wird gezeigt, dass die in dieser Arbeit verwendeten Anrisszonen etwas weniger homogen als jene von Vontobel (2011) sind und sich über grössere Wertebereiche erstrecken. Die grösste Standardabweichung bei den Anrisszonen beträgt 11.7°.

#### Hänge

Obwohl als Schwellenwert für die Neigung der Hänge der Bereich 30° bis 60° festgelegt wurde, weisen die Hänge vereinzelt Werte unter 30° und über 60° auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Werte der Anrisszonen ebenfalls in die Hangstatistik einberechnet werden. Ausserhalb der Anrisszone sind bei allen Hängen nur Werte von 30° bis 60° zu finden.

Bei einer 10 m-Auflösung weisen die Hänge Maximalwerte von 27° bis 65° auf. Die Durchschnittswerte der einzelnen Hänge variieren von 20° bis 49°. Minimalwerte treten von 2° bis 43° auf.

#### Vergleich Anrisszonen - Hänge

Werden die unterschiedlichen Neigungs-Spannbreiten der Anrisszonen und Hänge nun in den Bereichen Maximum, Mittelwert (Mean) und Minimum verglichen, fällt auf, dass jeweils um ein Grad Unterschied fast dieselben Wertebereiche vorhanden sind.



Die Boxplots in folgender Abbildung zeigen die Verteilung der Werte genauer auf:

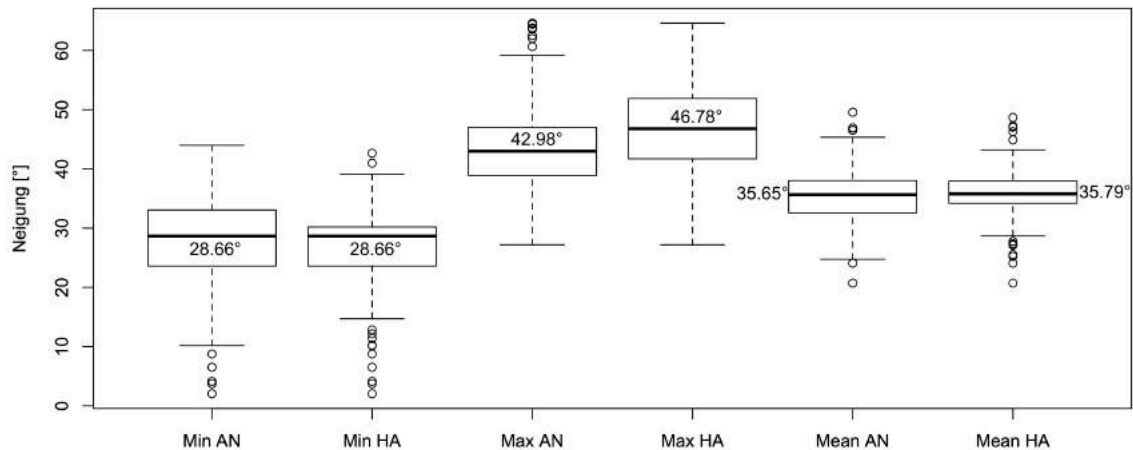


Abbildung 5.12: Boxplots zur Neigung (AN = Anrisszone; HA = Hang)

Bei den Ausreißern gegen unten bei den Minimalwerten ist klar zu erkennen, dass jene bei Anrisszone sowie Hang genau an denselben Neigungen auftreten. Dies hängt nun mit der oben genannten Erklärung zusammen, dass Werte unter  $30^\circ$  bei Hängen nur innerhalb der vorgegebenen Anrisszone (als Seedpixel) bestehen. Ebenfalls zu erkennen ist, dass der Median der Minimalwerte der Hänge sowie der Anrisszonen dem gleichen Wert entspricht. Natürlich dürfen mit oben genannter Erklärung bei den Hängen keine Werte unterhalb des Medians (oder generell unter  $30^\circ$ ) hinzukommen, folglich ist der Median derselbe. Bei den Maximalwerten hingegen hatten die Hänge die Möglichkeit sich gegen oben hin zu einer grösseren Neigung (bis zu  $60^\circ$ ) auszubreiten, darauf ist der höhere Median bei den Hängen zurückzuführen. Über den ganzen Plot hinweg gesehen ist auffällig, dass sich die Spannweite der Bereiche bei Anrisszone und Hang aber kaum unterscheidet.

In Abbildung 5.13 sind die Wertebereiche des Hanges gegenüber jenen der dazugehörigen Anrisszone geplottet. Logischerweise muss die obere linke Ecke frei bleiben, da sobald eine Anrisszone einen bestimmten Wertebereich aufweist, deren Hang mindestens dieselbe Spannweite aufzeigt.

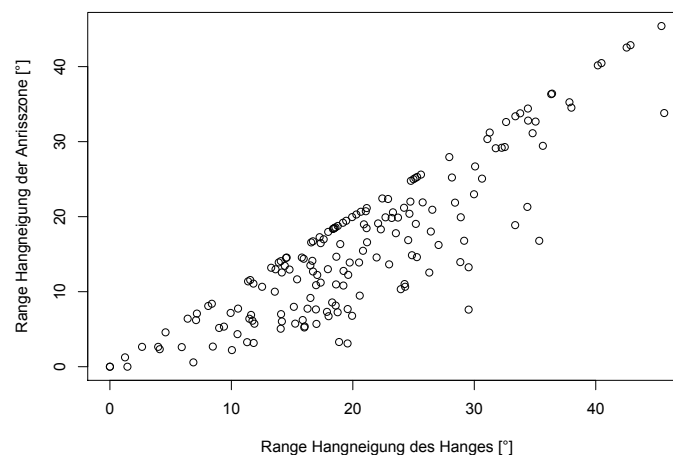


Abbildung 5.13: Neigungsspannweite der Anrisszone vs. jene der Hänge

Viele Werte liegen aber direkt auf der Diagonalen, was bedeutet, dass die Ranges der Anrisszone und des Hanges gleich gross sind. Dies trifft auf 27.3% der Werte zu. 61.0% weisen maximal  $5^\circ$  mehr

beim Hang als bei der Anrisszone auf. Maximal 10° Unterschied sind bei 84.3% der Werte vorhanden. Der grösste Unterschied in der Spannweite beträgt 21.92°. Die Anrisszone alleine weist 7.61° an Spannweite auf, der Hang dementsprechend 29.53°. Dieser Hang nützt also fast den gesamten erlaubten Wertebereich von 30° bis 60° aus.

Sieben Anrisszonen (und folglich auch deren Hänge) weisen Maximalwerte über 60° auf, was nach Maggioni & Gruber (2003) als zu steil gilt, so dass keine Schneeablagerungen stattfinden und dementsprechend keine Lawinen ausgelöst werden können. Diese Problematik wird im Kapitel Diskussion unter 6.1 näher erläutert.

### 5.1.4 Exposition

Zur Ermittlung der Exposition wurden acht Klassen gebildet, welchen der Expositions-Mittelwert der Anrisse und Hänge zugeteilt wurde.

Die Klassen wurden wie in Abbildung 5.14 erkennbar eingeteilt.

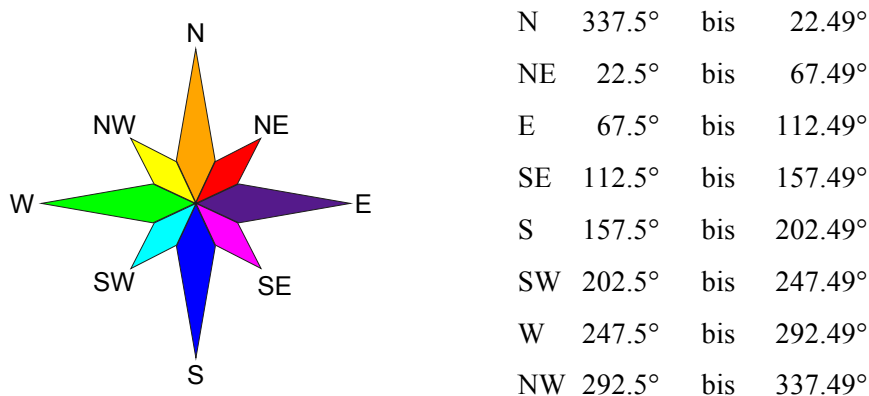


Abbildung 5.14: Windrose der Expositionsklassen und deren Wertebereiche

### Anrisszonen

In Abbildung 5.15 ist klar zu erkennen, dass Anrisszonen vermehrt in nördlich exponierten Gebieten liegen. Die Klassen NW-N-NE beinhalten 54% der abgegangenen Lawinen. Ebenfalls offensichtlich ist, je südlicher die Exposition, desto weniger Lawinen sind vorhanden. Gründe dafür werden im Kapitel Diskussion unter 6.1 genannt.

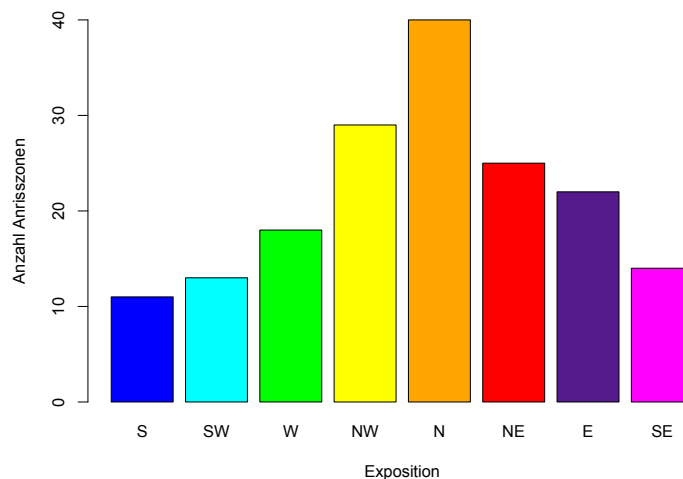


Abbildung 5.15: Zuteilung der Anrisszonen zu Expositionsklassen

Es sind auch Unterschiede bezüglich Exposition im jahreszeitlichen Vorkommen von Lawinen zu erkennen. Auffällig in Abbildung 5.16 ist das massive Vorkommen im Spätwinter (16. März bis 30. April) an Nordlagen, was auch die Daten von Vontobel (2011) aufzeigen. Auch die wenigen Lawinen, welche sich von Mai bis November ereignet haben, fanden in den nordexponierten Gebieten statt. Zu erkennen ist auch die Häufigkeit der Lawinen in den verschiedenen Monaten. Sowohl von Dezember bis Ende Januar als auch von Februar bis Mitte März gab es je 62 Lawinen, von Mitte März bis Ende April 44 und während des Rests des Jahres noch 4.

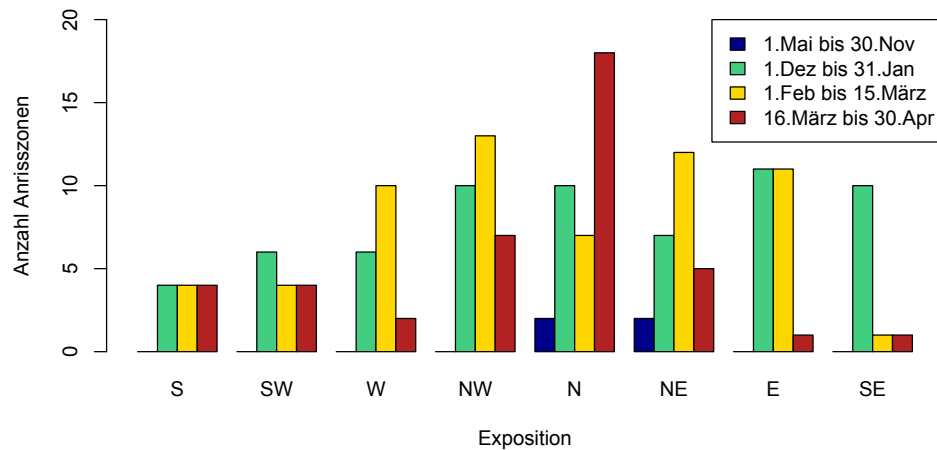


Abbildung 5.16: Saisonale Exposition bei Anrisszonen

Werden nun die Expositionswerte der Anrisszonen mit jenen aus der SLDB verglichen, fällt auf, dass die SLDB sechzehn Klassen verwendet und nicht nur acht wie in dieser Arbeit. Ausserdem sind in der SLDB keine Werte in Grad zu finden, sondern nur die Bezeichnung der Ausrichtung (S, SSW, SW, WSW, W, WNW, NW, NNW, N, NNE, NE, ENE, E, ESE, SE, SSE). Folglich ist nicht exakt zu erkennen, wie diese sechzehn Klassen zustande kommen. Um sie besser mit den hier ermittelten Expositionswerten vergleichen zu können, wurden die in dieser Arbeit verwendeten Anrisszonen auch in diese sechzehn Klassen eingeteilt, wobei folgende Aufteilung gilt:

N	348.75° bis 11.24°	NNE	11.25° bis 33.74°
NNW	326.25° bis 348.74°	NE	33.75° bis 56.24°
NW	303.75° bis 326.24°	ENE	56.25° bis 78.74°
WNW	281.25° bis 303.74°	E	78.75° bis 101.24°
W	258.75° bis 281.24°	ESE	101.25 bis 123.74°
WSW	236.25° bis 258.74°	SE	123.75° bis 146.24°
SW	213.75° bis 236.24°	SSE	146.25° bis 168.74°
SSW	191.25° bis 213.74°	S	168.75° bis 191.24°

Tabelle 5.4: Einteilung der Expositionswerte in 16 Klassen

Werden nun die verschiedenen Datensätze, beide in sechzehn Klassen eingeteilt, verglichen, entsteht folgendes Resultat:

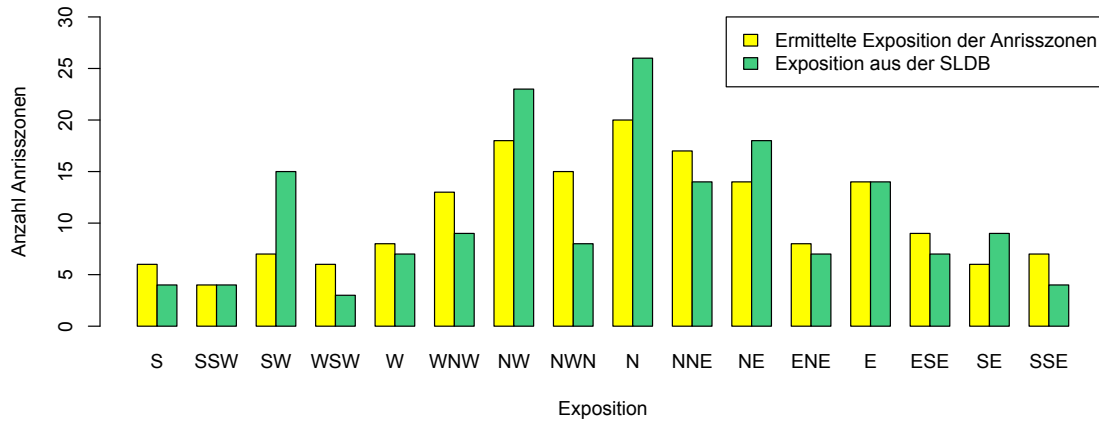


Abbildung 5.17: Ermittelte Exposition vs. Exposition aus SLDB

Wie in Abbildung 5.17 zu erkennen ist, treten relativ grosse Unterschiede auf. Ausserdem widerspiegeln hier gleiche Werte keineswegs, dass jene durch dieselben Anrisszonen erreicht wurden. Diese Unterschiede hängen möglicherweise auch mit der Definition der Klassen zusammen. Werden aber die Daten genauer betrachtet, fällt auf, dass 56.4% genau derselben Klasse zugeteilt wurden, während 39.5% sich um eine Nachbarsklasse unterscheiden (zum Beispiel im einen Datensatz NE, im anderen NNE). Lediglich sechs Lawinen wurden um zwei Klassen anders klassiert (zum Beispiel NE und N), während eine einzelne Anrisszone drei Klassen Unterschied aufzeigt. Im Grossen und Ganzen sind die Unterschiede der beiden Datensätze folglich nicht wirklich gross.

### Hänge

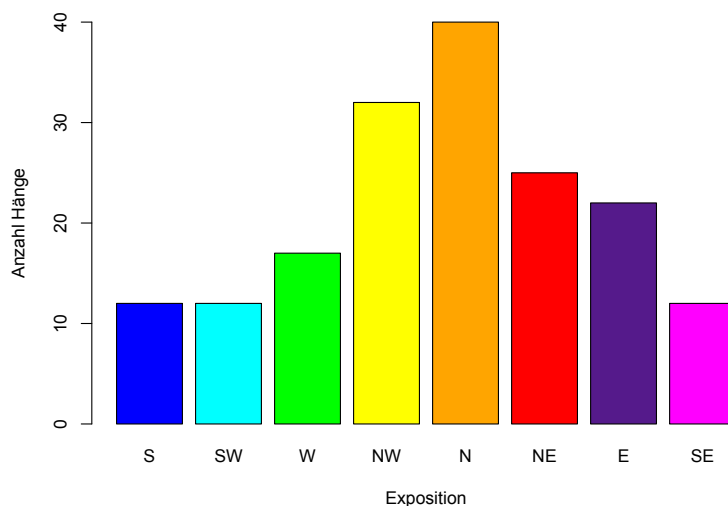


Abbildung 5.18: Zuteilung der Hänge zu Expositionsklassen

Die ermittelten Hänge weisen vermehrt die Exposition „Nord“ auf. 56% der Hänge liegen im Bereich NW-N-NE.

### Vergleich Anrisszonen - Hänge

Die Unterschiede zwischen der Exposition bei Anrisszonen und derjenigen bei Hängen fallen minimal aus. Durch die Begrenzung der unendlichen Expositionsfortpflanzung hatten die Mittelwerte der Anrisszonen nicht die Möglichkeit, sich gross zu verändern.

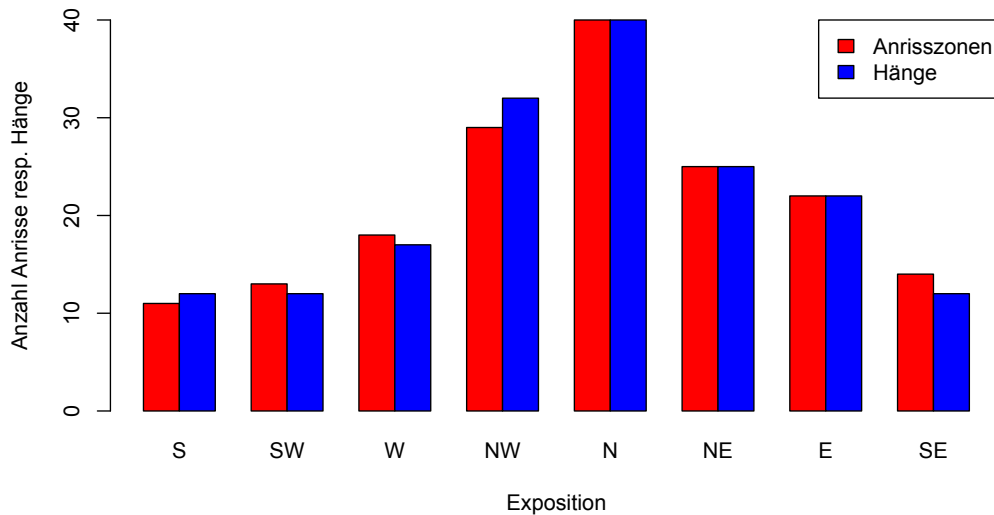


Abbildung 5.19: Exposition bei Anrisszonen vs. Exposition bei Hängen

Bei den Spannweiten der Expositionen in Abbildung 5.20 ist zu erkennen, dass viele Hänge dieselbe Bandbreite aufweisen wie die zugehörige Anrisszone. Wie bei allen Parametern gilt hier dasselbe: die Spannweite des Hanges muss mindestens so gross sein wie jene der Anrisszone. Die Werte der Hänge sind folglich gegen unten durch jene der Anrisszone beschränkt.

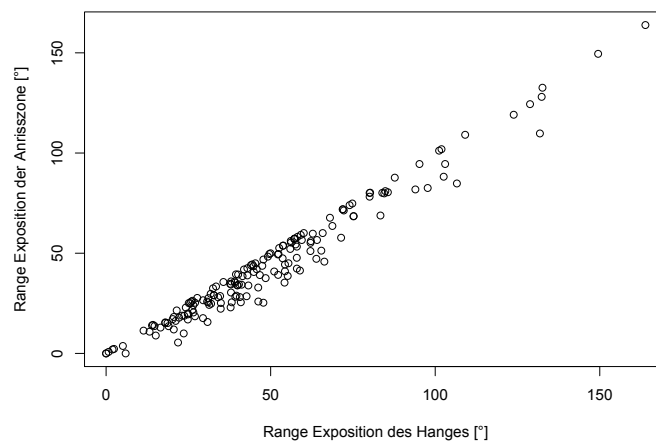


Abbildung 5.20: Expositionsspannweite bei Anrisszonen vs. dieselbe bei Hängen

24% der Werte weisen bei Anrisszone und Hang genau dieselbe Spannweite auf. Im Vergleich zu anderen Parametern ist aber gegen oben hin auch schnell die Begrenzung durch den Schwellenwert der erlaubten Spannweite der Exposition zu bemerken.

Im Kapitel Methodik wurde bereits erläutert, wie dieser Schwellenwert in Bezug auf die Exposition pro Anrisszone zustande kam.

Bei den Resultaten interessiert nun, wie die Expositionsspannweite der Hänge entstanden ist. Dafür wird einerseits die Differenz „Expositionsspannweite der Anrisszone – möglicher Expositionsränge der Hänge“ und andererseits die Differenz „Expositionsspannweite der Anrisszone – tatsächlicher Expositionsränge der Hänge“ betrachtet.

Folgende Kombinationen beider Differenzen sind möglich:

Kombination	Range AN minus möglicher Range HA	Range AN minus tatsächlicher Range HA
A	Negativ	Null
B	Negativ	Positiv
C	Positiv	Null
D	Positiv	Positiv
E	Null	Null

Tabelle 5.5: Kombinationen der Spannweiten bei der Exposition (AN = Anriss, HA = Hang)

Die **Kombination A** kommt zustande, wenn die Standardabweichung \* 5 (je 2.5-mal vom Mittelwert aus) nicht die gesamte Spannweite der Anrisszone abdeckt. Da aber der Range des Hanges grösser gleich jenem der Anrisszone ist – da jeder Hang die Anrisszone beinhaltet – wird die Spannweite des Hanges automatisch auf jene der dazugehörigen Anrisszone hochgesetzt. Diese Kombination tritt bei 11.6% der verwendeten Daten auf.

Die **Kombination B** ereignet sich wie bei A bei der Standardabweichung \* 5, welche nicht die ganze Spannweite der Anrisszone abdeckt. Allerdings liegt der Mittelwert nicht in der Mitte der Wertespanne, so dass Werte grösser als das Maximum des Anrisses oder kleiner als das Minimum des Anrisses hinzugenommen werden können. So wird der gesamte Wertebereich der Anrisszone plus die hinzukommenden Werte durch die Hangfortpflanzung als Spannbreite festgelegt. Diese Kombination macht 5.2% der Daten aus.

Die Entstehung der **Kombination C** hängt nicht wirklich mit dem Schwellenwert der erlaubten Expositionsspannweite zusammen. Laut diesem dürfte sich die Anrisszone zu einem grösseren Hang ausbreiten, die Spannbreite bleibt allerdings genau dieselbe wie bei der Anrisszone aufgrund der anderen Parameter. In die Kategorie „Kombination C“ fallen 12.2% der verwendeten Daten.

Bei **Kombination D** kann sich der Hang laut Schwellenwert ausbreiten und nutzt diese Möglichkeit auch. Der Wertebereich des Hanges ist folglich grösser als jener der Anrisszone, bleibt aber immer im durch die Schwellenwerte erlaubten Bereich. In die Kombination D fallen am meisten Daten, diese macht 69.2% der Daten aus.

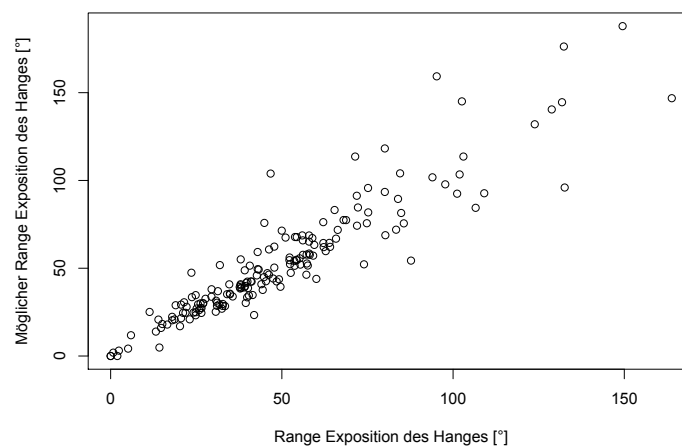
**Kombination E** kommt selten vor. Dabei handelt es sich um Anrisszonen, welche aus einem einzelnen Pixel bestehen. Folglich weisen jene keine Spannweite an Expositionswerten auf und können sich nach der Definition, dass der Hang den Range der Standardabweichung \* 5 betragen darf, auch nicht ausweiten. 1.7% der Daten gehören der Kombination E an.

Diese fünf Kombinationen wurden bei der Analyse der Abbildung 5.20 gefunden und sollen zum besseren Verständnis dienen. Für einen besseren Überblick ist in Tabelle 5.6 die prozentuale Verteilung der Daten nochmals aufgezeigt.

Kombination	Anzahl AN resp. HA	Prozentual [%]
A	20	11.6
B	9	5.2
C	21	12.2
D	119	69.2
E	3	1.7

**Tabelle 5.6: Verteilung der vorkommenden Kombinationen (AN = Anriss, HA = Hang)**

Nun stellte sich natürlich noch die Frage, wie die erlaubte Spannweite durch die wachsenden Hänge ausgenutzt wurde. Die Ergebnisse sind der Abbildung 5.21 zu entnehmen.



**Abbildung 5.21: Mögliche Expositionsspannweite bei Hängen vs. tatsächliche**

Die meisten Werte liegen im Bereich der Diagonalen und nützen somit auch ungefähr die gegebene Spannweite aus. Die Werte links der Diagonalen zeigen, dass nicht alle Hänge den ganzen Wertebereich ausgenutzt haben, was mit anderen Schwellenwerten zu tun haben muss. Die Werte rechts unten weisen eine grössere Spannweite auf, als ihnen der Schwellenwert zugestehen würde. Folglich durfte ausserhalb der Anrisszone ein kleinerer Range an Werten hinzugefügt werden, als er innerhalb der Anrisszone besteht.

### 5.1.5 Kurvatur

Zur Ermittlung der Geländeform wurden der Mittelwert der Plan- sowie Profilkurvatur für die Anrisszonen sowie für die Hänge ermittelt. Anschliessend wurden diese Kombinationen einer der neun Klassen von Dikau (1989) zugeteilt.

### Anrisszonen

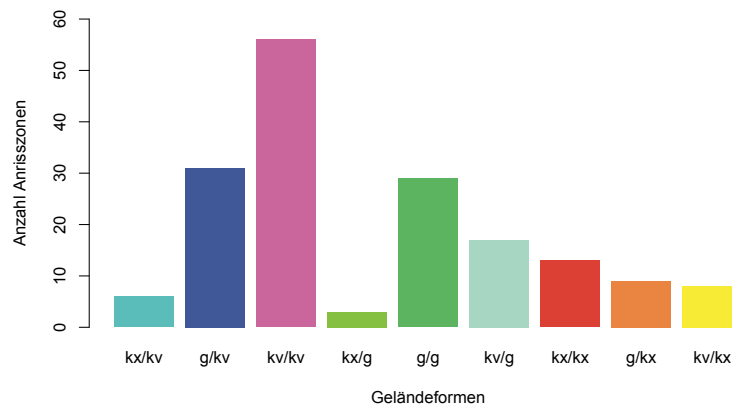


Abbildung 5.22: Krümmung bei Anrisszonen

Wie in Abbildung 5.22 zu erkennen, treten Anrisszonen vor allem bei konkaver Profil- und konkaver Plankrümmung auf. Diese Geländeform macht beim verwendeten Datensatz genau 33% aus. An zweiter und dritter Stelle stehen gerade Profilkümmung und konkave/gerade Plankümmung. 47% weisen eine konkave Profilkümmung, 54% der Anrisszonen eine konkave Plankümmung auf. Dies deckt sich auch mit der Literatur: Lawinen finden oft an konkaven Hängen statt (Schweizer et al., 2003; McClung, 2001).

Um die in dieser Arbeit erhaltene Zuteilung zu den Geländeformen mit derjenigen von Vontobel (2011) zu vergleichen, wurden die gleichen Farben sowie dieselbe Reihenfolge verwendet.

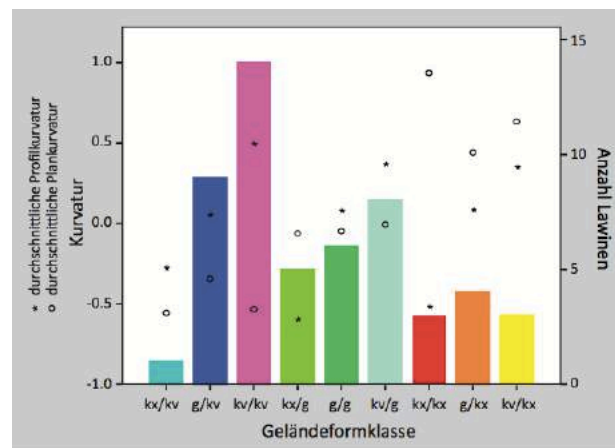


Abbildung 5.23: Krümmung bei Vontobel (2011)

Beim Betrachten der beiden Graphiken unterscheiden sich vor allem die Balken zweier Geländeformklassen in ihrer Höhe: Die Klasse kx/g sowie kv/g weisen bei Vontobel verhältnismässig viel mehr Werte auf. In welcher Klasse diese überzähligen Werte in der vorliegenden Arbeit auftreten, ist nicht so einfach ersichtlich. Da sich die Anzahl der verwendeten Anrisse massiv unterscheidet (bei Vontobel ist  $N = 53$ , hier gilt  $N = 172$ ) und dementsprechend völlig unterschiedliche Skalen in y-Richtung bestehen, widerspiegeln die anderen sieben Klassen etwa dasselbe Verhältnis. Werden die Klassen aber prozentual untersucht, sind die überzähligen Werte aus Vontobels Klassen kx/g und kv/g in der vorliegenden Arbeit bei den Geländeformen kv/kv und g/g zu finden.



## Hänge

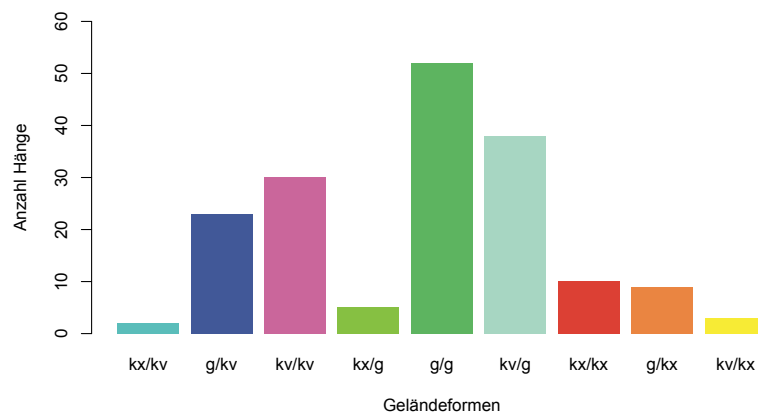


Abbildung 5.24: Kurvatur bei Hängen

Es ist zu erkennen, dass die Mittelwerte der potentiellen Hänge rund um Anrisszonen vor allem bei gerader Profil- zusammen mit gerader Plankurvatur auftreten. Diese machen beim verwendeten Datensatz 30% aus. An zweiter und dritter Stelle stehen jeweils konkave Profilkurvatur mit konkaver/gerader Plankurvatur. Auffällig ist, dass die vier höchsten Balken alle nur aus den verschiedenen Mischungen von gerade und konkav bestehen und keiner davon den Faktor konvex aufweist.

## Vergleich Anrisszonen - Hänge

In Abbildung 5.25 fällt auf, dass Anrisszonen und Hänge bei den vier gleichen Klassen die höchsten Werte zeigen, allerdings in unterschiedlicher Reihenfolge.

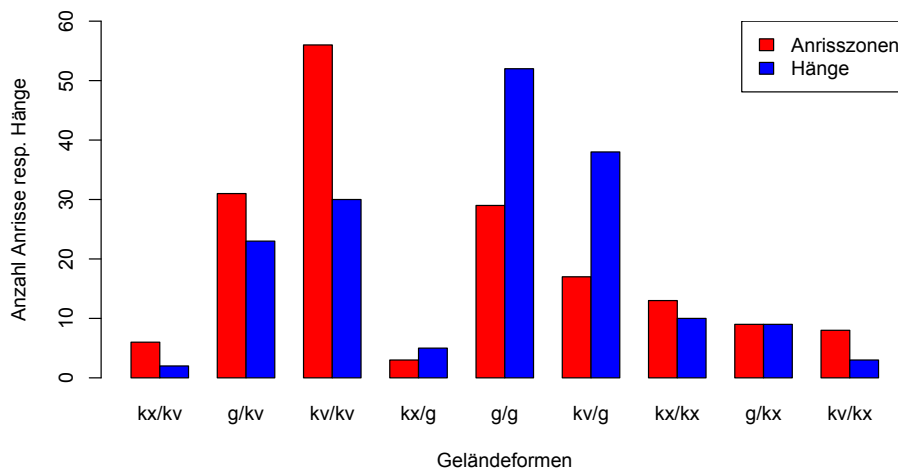


Abbildung 5.25: Kurvatur bei Anrisszonen vs. Kurvatur bei Hängen

Offenbar hat sich die Kurvatur durch die Fortpflanzung der Anrisszonen zu Hängen hin so verändert, dass die Durchschnittswerte vermehrt in den geraden Bereichen liegen. Dies hängt natürlich auch mit der Festsetzung des Schwellenwertes zusammen, wo die Werte von konkav nach gerade oder von konvex nach gerade übergehen. Ausserdem ist zu bedenken, dass hier nur mit dem Mittelwert der jeweiligen Anrisszone und des jeweiligen Hanges gearbeitet wird und möglicherweise völlig andere Ergebnisse entstehen würden beim Einbezug der gesamten Wertebereiche.

## 5.1.6 Rauigkeit

Wie schon in Kapitel 4.3.1 der Methodik erläutert, handelt es sich hier um eine masslose Grösse.

### Anrisszonen

Im Boxplot der Abbildung 5.26 ist zu erkennen, dass für viele Anrisszonen die Maximalwerte unter dem gewählten Schwellenwert von 0.5 liegen. Bei genau 12.2% der Anrisszonen trifft dies nicht zu, der höchste Rauigkeitswert liegt bei 1.7. Allerdings handelt es sich bei diesen hohen Werten lediglich um einzelne Pixel in diesen Anrisszonen.

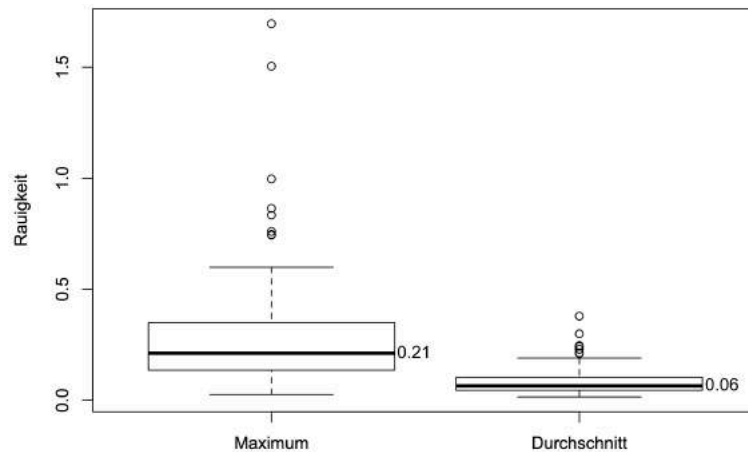


Abbildung 5.26: Rauigkeitsverteilung bei Anrisszonen

Bei den Durchschnittswerten ist hingegen sehr gut zu erkennen, dass diese alle im erlaubten Bereich liegen. Die Durchschnittswerte gehen von 0.015 bis 0.379.

Für die Maximalwerte beträgt der Mittelwert 0.27, die Daten sind also leicht rechtsschief verteilt. Der Mittelwert bei den Durchschnittswerten beträgt 0.08 und ist somit auch leicht höher als der zugehörige Median. Minimalwerte treten von 0.0 bis 0.22 auf.

### Hänge

Auch für die Hänge um die Anrisszonen wurde die Rauigkeit ermittelt, die Verteilung der Daten ist der Abbildung 5.27 zu entnehmen.

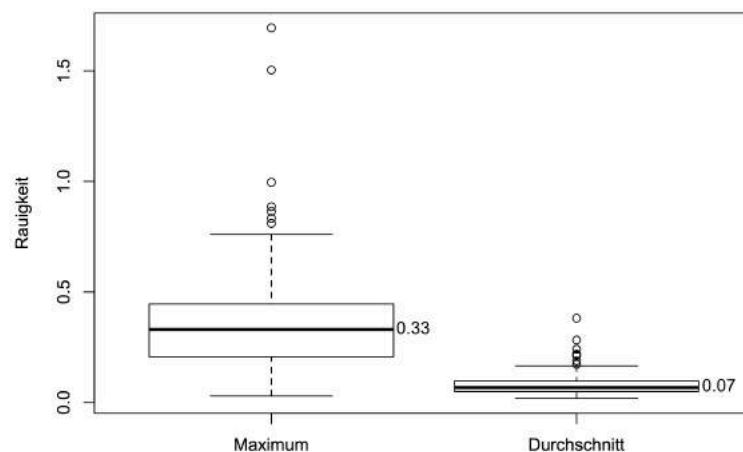


Abbildung 5.27: Rauigkeitsverteilung bei Hängen

Auch hier liegen die meisten Maximalwerte der Hänge unter 0.5. Dies ist aber nur logisch, da 0.5 als Schwellenwert festgesetzt wurde und alles, was nicht bereits in der Anrisszone vorhanden war und über 0.5 liegt, nicht zur Region hinzugefügt wurde. Wird der Median der Maximalwerte (0.33) mit dem Mittelwert derer verglichen (0.35), besteht ein winziger Unterschied. Dasselbe gilt für Median und Mittelwert der Durchschnittswerte, diese betragen 0.07 und 0.08. Die Durchschnittswerte reichen von 0.018 bis 0.381. Minimalwerte treten von 0.0 bis 0.15 auf.

### **Vergleich Anrisszonen - Hänge**

Alle Werte über 0.5 bei den Hängen widerspiegeln die Werte der Anrisszonen über 0.5. Dementsprechend machen diese auch bei den Hängen 12.2% aus. Beim Vergleich der Verteilung der Maximalwerte fällt auf, dass jene der Hänge näher an den 0.5-Schwellenwert gerückt sind. Die Folge daraus ist, dass der obere Whisker der Hänge angestiegen ist. Werden aber die Durchschnittswerte und deren Spannbreiten verglichen (Anrisse: 0.015 bis 0.379, Hänge: 0.018 bis 0.381), fallen diese ziemlich ähnlich aus.

## 5.2 Evaluation der erhaltenen Hänge

Wie schon in Kapitel 4.6 erklärt, ist es nicht möglich, eine normale Evaluation durch Vergleiche mit anderen Quellen durchzuführen, da keine anderen Quellen zu dieser Thematik bestehen. Deshalb wurden andere Methoden zur Evaluation verwendet; die Resultate folgen in den nächsten Kapiteln.

### 5.2.1 Einfluss der Parameter

In diesem Kapitel soll aufgezeigt werden, welcher Parameter einen wie grossen Einfluss auf die Resultate der erhaltenen Hänge hat. Dafür wurde der Algorithmus mehrmals durchgeführt, wobei immer ein Schwellenwert weggelassen wurde. Auf diese Weise kann der Einfluss des jeweiligen Parameters näher untersucht werden. Zusammenfassend werden hier erneut die gewählten Parameter inklusive Schwellenwerte für eine Auflösung von 10 m aufgelistet:

Absolute Neigung	30° bis 60°
Neigungsänderung	> 0.92
Erlaubte Spannbreite der Exposition pro Anrisszone	Range von 5-mal der Standardabweichung, (je 2.5-mal vom Mittelwert aus)
Expositionsänderung	< 6°
Absolute Rauigkeit:	< 0.5

Tabelle 5.7: Verwendete Parameter inklusive Schwellenwerte

Für jeden weggelassenen Parameter wurde im Folgenden eine Farbe gewählt. Dazu werden fünf Beispiele in der Abbildung 5.28 gezeigt. Die Farbe „gelb“ wurde dabei als Ausgangslage festgelegt, sodass mit dem tatsächlich erhaltenen Ergebnis verglichen werden kann.

	Erhaltene Hänge mit allen obengenannten Schwellenwerten
	Erhaltene Hänge ohne Rauigkeit
	Erhaltene Hänge ohne die absolute Neigung
	Erhaltene Hänge ohne die Neigungsänderung
	Erhaltene Hänge ohne den Parameter Neigung (weder die absolute Neigung noch die Neigungsänderung)
	Erhaltene Hänge ohne die erlaubte Spannbreite der Exposition pro Anrisszone
	Erhaltene Hänge ohne die Expositionsänderung
	Erhaltene Hänge ohne den Parameter Exposition (weder die die erlaubte Spannbreite der Exposition noch die Expositionsänderung)

Es folgen Beispiele der unterschiedlichen Ausbreitung der Parameter.

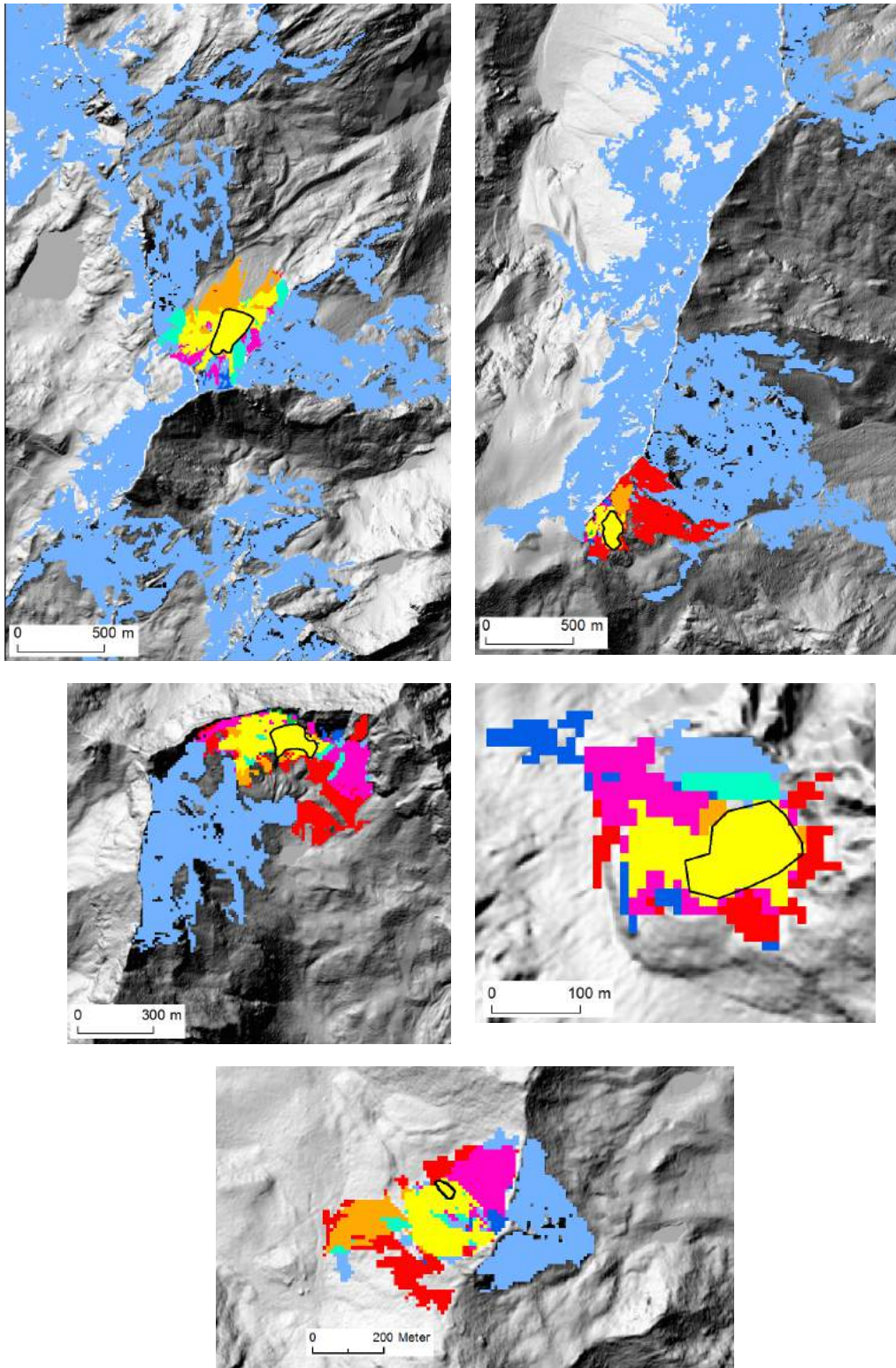


Abbildung 5.28: Einfluss (nicht) verwendeter Parameter  
 Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Zur besseren Veranschaulichung wird hier die erhaltene Anzahl Pixel, je nach vorhandenen Parametern für das Untersuchungsgebiet „Zone 1“ aufgezeigt. Eingerückte Parameter (Neigung und Exposition) setzen sich aus je zwei Schwellenwerten zusammen, die bei der Durchführung des Algorithmus beide weggelassen wurden.

Parameter	Anz. Pixel	Prozentuale Zunahme (von allen Parametern ausgehend)
Alle Parameter verwendet	8571	-
Ohne Rauigkeit	8624	0.6%
Ohne absolute Neigung	14'350	67.4%
Ohne Neigungsänderung	14'074	64.2%
Ohne Neigung	25'396	196.3%
Ohne erlaubte Spannweite der Exposition	14'310	67.0%
Ohne Expositionsänderung	16'350	90.8%
Ohne Exposition	507'113	5816.6%

Tabelle 5.8: Einfluss (nicht) verwendeter Parameter in Zahlen

Es fällt auf, dass das Weglassen des Parameters Rauigkeit kaum einen Einfluss auf die Grösse der Hänge aufweist (in den Abbildungen sind ja kaum grüne Pixel zu erkennen). Da die Rauigkeit aber vor allem zur Eliminierung der Vegetation einbezogen wurde und Lawinen meistens oberhalb der Waldgrenze auftreten, ist verständlich, dass die Auswirkung des Weglassens so minim ausfällt. Offensichtlich ist, dass der Parameter Expositionsänderung – von jenen mit nur einem Schwellenwert – den grössten Einfluss unter den Parametern auf das Ergebnis der Hänge aufzeigt. Generell ist der Unterschied im Einbeziehen und Weglassen der Exposition, ob relativ oder die erlaubte Spannbreite, extrem gross. Die Festlegung dieser beiden Schwellenwerte war dementsprechend sehr wichtig, damit Regionen nicht ins Unendliche wachsen.

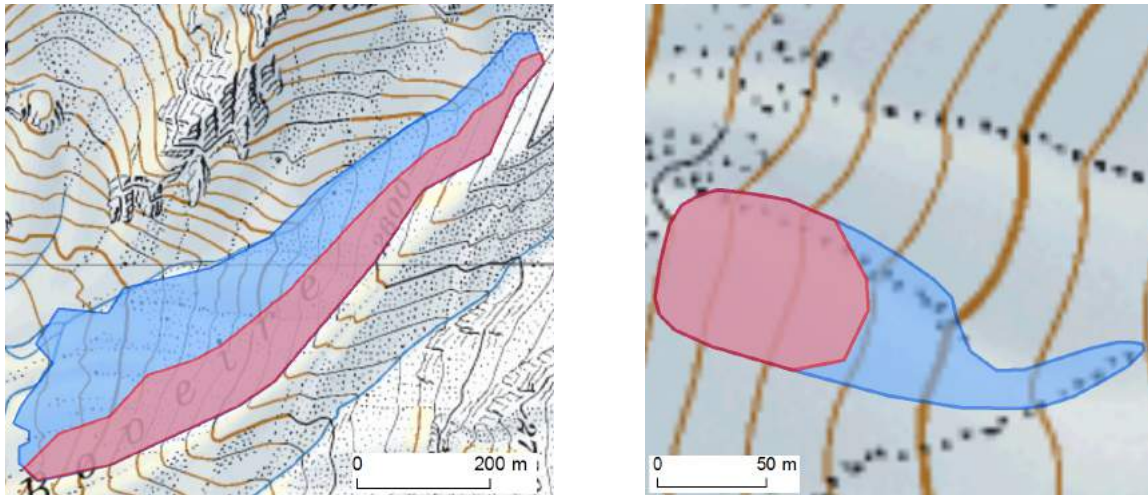
### 5.2.2 Compactness

Bei der Compactness gilt ein Kreis als perfekt und ergibt den Wert 1. Der Wertebereich variiert von 0 bis 1. Je näher an 1, desto mehr gleicht die Form einem Kreis. Für die Anrisszonen sowie deren Hänge wurde diese Compactness errechnet, um eine Evaluation der erhaltenen Hänge zu bekommen.

#### Anrisszonen

Die Werte der Compactness der Anrisszonen variieren von 0.425 bis 0.966. Wie anhand dieser Werte zu erkennen ist, variieren bereits die Anrisszonen stark in ihrer Kompaktheit, obwohl diese noch keine Löcher aufweisen, wie es die Hänge tun.

Da der Kreis mit dem Wert 1 als perfekt gilt, gelten längliche Formen als viel weniger kompakt.

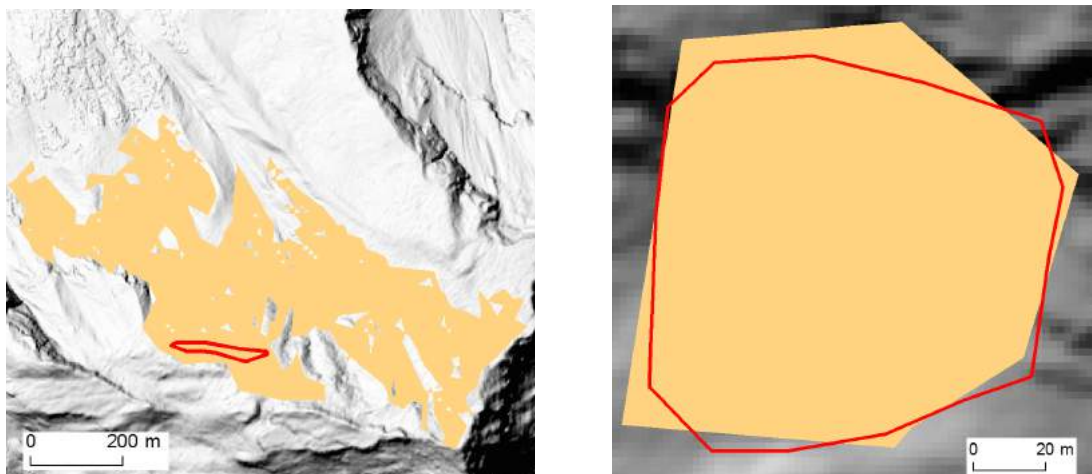


**Abbildung 5.29: Lange vs. runde Anrisszone**  
 Verwendete Daten: Pixelkarte 1:25'000 von Swisstopo

In Abbildung 5.29 links ist die Anrisszone mit der tiefsten Compactness und rechts jene mit der höchsten zu erkennen (rot = Anrisse, blau = Lawinenabgang).

### Hänge

Die Werte der Compactness bei den Hängen erstrecken sich von 0.195 bis 0.926. In Abbildung 5.30 sind nun die Hänge mit der tiefsten (links) und der höchsten (rechts) Compactness zu sehen. Zum Vergleich sind deren Anrisszonen (rot) links mit dem Compactness-Wert 0.699 und rechts 0.918 eingezeichnet. Folglich ist zu erkennen, dass der rechte Hang sogar eine minimal grössere Kompaktheit als die dazugehörige Anrisszone aufweist.



**Abbildung 5.30: Compactness bei Hängen**  
 Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

Ausserdem fällt beim Überprüfen der Resultate auf, dass, je grösser die Hänge werden, desto schlechter ist die Compactness. Wie in der Methodik aufgezeigt, bleibt der Compactness-Wert derselbe, solange gleiche Verhältnisse von Grösse zu Umriss herrschen. Allerdings bringen grössere Hänge vermehrt die Gefahr mit sich, dass einerseits Löcher und andererseits viele Einbuchtungen, wie sie in Abbildung 5.30 links zu erkennen sind, entstehen. Diese Einbuchtungen werden durch einen

längeren Umriss widerspiegelt, was wiederum zu einer tieferen Compactness führt. In Abbildung 5.31 ist eindeutig ein negativer Zusammenhang zwischen der Grösse des Hanges und der Compactness zu vermuten, welcher genau auf oben genannte Veränderung des Verhältnisses von Grösse und Umriss zurückzuführen ist. Anschliessend an die Abbildung folgt die Korrelationsanalyse zur Bestätigung der Theorie (siehe Tabelle 5.9). Der Korrelationskoeffizient von -0.707 ist als relativ starke Korrelation zu werten.

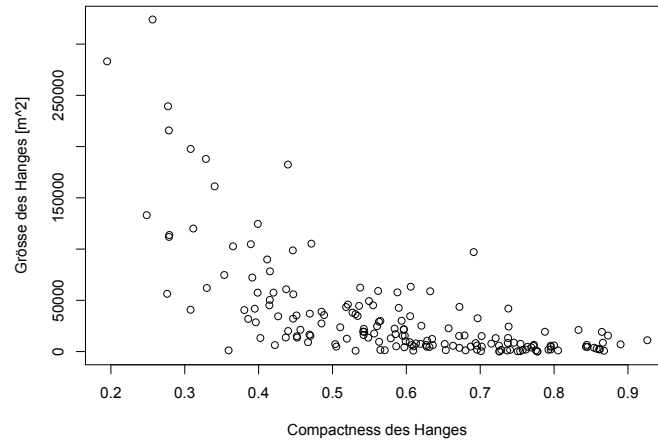


Abbildung 5.31: Grösse des Hanges vs. Compactness des Hanges

Test nach Spearman (N = 172)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Hanggrösse – Compactness_Hang	0.000	-0.707

Tabelle 5.9: Korrelationsanalyse Hanggrösse - Compactness Hang

### Vergleich Anrisszonen - Hänge

Beim Vergleichen der Compactness-Werte von Anrisszonen und zugehörigen Hängen in Abbildung 5.32 scheint kein sichtbarer Zusammenhang zu bestehen.

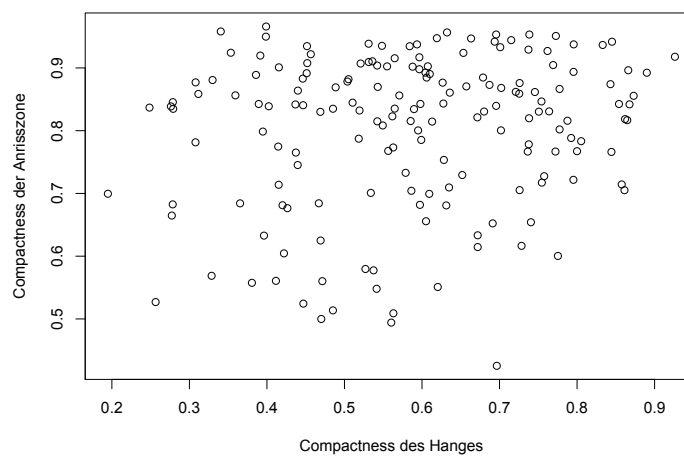


Abbildung 5.32: Compactness der Anrisszone vs. Compactness des Hanges

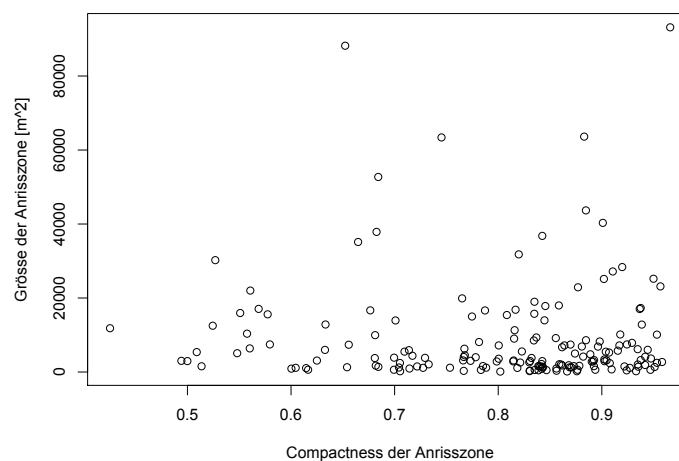


Dies wird durch die durchgeführte Korrelationsanalyse in Tabelle 5.10 bestätigt. Zwischen den Daten besteht kein signifikanter Zusammenhang.

Test nach Spearman (N = 172)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Compactness_Anriiss – Compactness_Hang	0.126	0.117

**Tabelle 5.10: Korrelationsanalyse Compactness der Anrisszone - Compactness des Hanges**

Wie allerdings bei den Hängen in Tabelle 5.9 ersichtlich, besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Grösse eines Hanges und seiner Kompaktheit. Ob dieser Zusammenhang auch bereits bei den Anrisszonen anzutreffen ist, soll im Folgenden ermittelt werden.



**Abbildung 5.33: Grösse der Anrisszone vs. Compactness der Anrisszone**

Durch den Plot in Abbildung 5.33 kann bereits die Vermutung aufgestellt werden, dass kein Zusammenhang besteht. Das wird mit der Korrelationsanalyse aus Tabelle 5.11 bestätigt. Während zwischen der Grösse eines Hanges und seiner Kompaktheit ein negativer Zusammenhang besteht, ist bei den Anrisszonen und ihrer Kompaktheit keine Korrelation zu finden. Anrisszonen weisen auch kaum Einbuchtungen auf, welche den Umriss vergössern und damit zu tieferen Compactness-Werten führen würden.

Test nach Spearman (N = 172)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Anrissgrösse – Compactness_Anriiss	0.673	-0.032

**Tabelle 5.11: Korrelationsanalyse Anrissgrösse - Compactness der Anrisszone**

Zur genaueren Untersuchung aller erhaltenen Compactness-Werte wird für jedes Objekt die Differenz „Compactness der Anrisszone – Compactness des Hanges“ gebildet, um eine Ahnung über die Veränderung der Daten zu bekommen. Die Differenz weist Werte von -0.271 bis 0.618 auf. Negative Werte zeigen auf, dass Hänge um Anrisszonen auch höhere Kompaktheitswerte als deren Anrisszonen aufweisen können. Folglich hat sich in diesen Fällen der Hang von einer länglichen Anrisszone zu

einem runderen Hang ausgebreitet. Dies trifft bei 15.7% der Daten zu. Bei allen anderen Werten ist die Compactness der Hänge tiefer als jene der zugehörigen Anrisszone. Dies hängt mit Löchern, länglicheren Formen sowie den oben erwähnten Einbuchtungen zusammen. Unter der Voraussetzung „je grösser ein Hang, desto geringer ist die Compactness“ ist anzunehmen, dass die Differenz zwischen Compactness der Anrisszone und Compactness des Hanges mit der Grösse des Hanges zunimmt.

### 5.2.3 Subjektive Beurteilung

Bei der subjektiven Beurteilung wurden, wie im Kapitel 4.6.3 beschrieben, die Hänge den drei verschiedenen Klassen „gut“, „mittel“ oder „schlecht“ zugeteilt. 95 Hänge wurden der Kategorie „gut“ zugeteilt, 65 sind in der Klasse „mittel“ enthalten und die restlichen 12 Hänge wurden als eher schlecht interpretiert. In Abbildung 5.34 werden die Resultate der subjektiven Beurteilung mit jenen der Compactness verglichen. Die Grösse des Hanges spielt dabei keine Rolle im Plot, wurde aber trotzdem zur Veranschaulichung miteinbezogen. Die grünen Werte (= Klasse „gut“) sind vor allem bei den hohen Compactness-Werten zu finden. Es werden also bei beiden Methoden dieselben Hänge als gut betrachtet. Die roten und gelben Werte sind allerdings mehr durchmischt, die schlecht empfundenen Hänge werden also anders wahrgenommen, als dies beim Resultat der Compactness der Fall ist. Dies wird in der Diskussion näher erläutert.

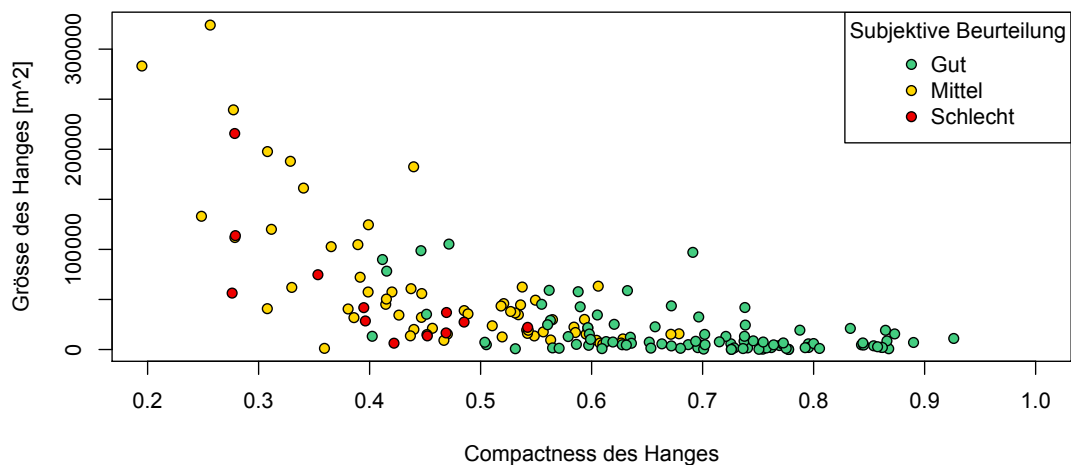


Abbildung 5.34: Subjektive Beurteilung verglichen mit der Compactness

### 5.3 Zusammenhänge mit Werten aus der SLDB

Um nun die Ergebnisse der Hänge noch genauer zu interpretieren, wurden sie im Zusammenhang mit bereits bekannten Werten aus der SLDB, wie Anrissmächtigkeit, Gefahrenstufe sowie Auslöseart, untersucht. In einem ersten Schritt wurden diese Werte immer zuerst mit den Anrisszonen verglichen, in einem zweiten Schritt mit dem ermittelten Verhältnis von Anriss zu Hang.

#### 5.3.1 Mittelwerte der Anrissmächtigkeit

Wie im Kapitel Methodik bereits erwähnt, existieren Mittelwerte der Anrissmächtigkeit sowie Maximalwerte derselben. Hier werden mögliche Zusammenhänge zu den Mittelwerten geprüft, während anschliessend die Maximalwerte genauer angeschaut werden.

#### Korrelationsanalyse Breite

Zur Veranschaulichung der Daten werden in Abbildung 5.35 die Plots beider Datensätze (Anrissbreite und Verhältnis Anriss-/Hangbreite) im Vergleich zu den Mittelwerten der Anrissmächtigkeit aufgezeigt. Es interessiert, ob die Annahme „je dicker die Anrissmächtigkeit, desto breiter die Anrisszone“ gilt. Ausserdem wird angenommen, dass dickere Mächtigkeiten den potentiellen Hang eher ausnutzen, was mit Werten nahe bei 1 korrelieren müsste.

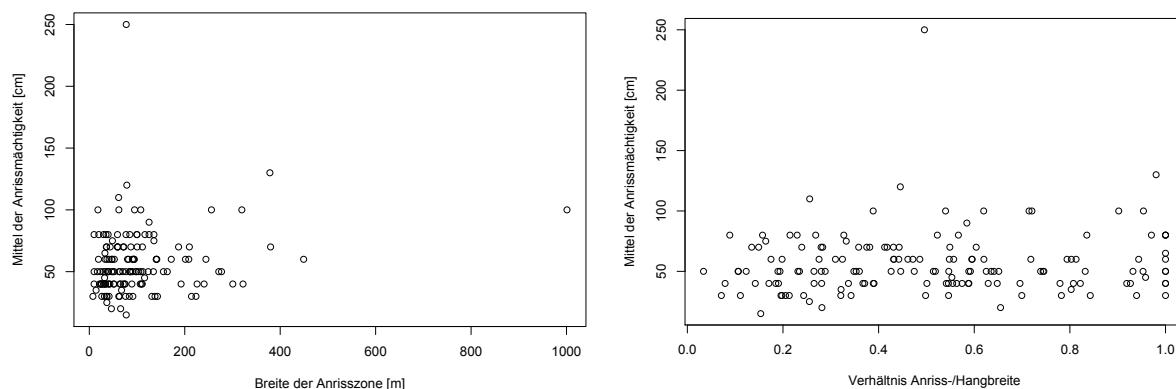


Abbildung 5.35: Mittel der Anrissmächtigkeit vs. Anrissbreite und vs. Verhältnis der Breiten

Auffällig an diesen Plots ist, dass viele Werte gleiche Anrissmächtigkeiten aufweisen (vor allem im Bild links erkennbar). Dies liegt daran, dass in der SLDB nur ganzzahlige Werte aufgeführt werden, wobei jeweils die letzte Ziffer auf fünf oder null (zehn) aufgerundet wurde.

Als erstes folgt der Test auf Normalverteilung: Durch den Kolmogorov-Smirnov-Test kann gezeigt werden, dass beide Datensätze nicht normalverteilt sind. Es folgt dementsprechend die Korrelationsanalyse nach Spearman. Wie im Kapitel 4.7 bereits aufgezeigt, lautet die Nullhypothese folgendermassen:

Es besteht keine Korrelation in der Grundgesamtheit ( $r = 0$ ).

Als Signifikanzniveau wird  $\alpha = 0.05$  festgelegt.

Test nach Spearman (N = 149)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Anrissbreite – Anrissmächtigkeit (Mean)	0.027	0.181
Verhältnis Breiten – Anrissmächtigkeit (Mean)	0.362	0.074

Tabelle 5.12: Korrelationsanalyse Anrissbreite/Verhältnis der Breiten – Mittelwerte Anrissmächtigkeit

Mit einer Signifikanz von 0.027 wird folglich die  $H_0$ -Hypothese für die Anrissbreite abgelehnt, die Daten korrelieren also. Der Korrelationskoeffizient fällt mit einem Wert von 0.181 allerdings sehr schwach positiv aus. Beim Verhältnis von Anriss- zu Hangbreite zu den Mittelwerten der Anrissmächtigkeit hingegen wird mit einer Signifikanz von 0.362 die  $H_0$ -Hypothese angenommen, zwischen den Daten besteht keine Korrelation.

Obwohl die Breite der Anrisszonen mit der Anrissmächtigkeit sehr schwach korreliert, ist dies beim Verhältnis der Breiten nicht der Fall. Dies hängt wohl mit den gewählten Schwellenwerten und den daraus folgenden unterschiedlichen Ausbreitungen der Hänge zusammen, was zu unterschiedlichen Verhältnissen bezüglich Breiten führt.

**Korrelationsanalyse Grösse**

Durch den Test auf Normalverteilung kann gezeigt werden, dass beide Datensätze nicht normalverteilt sind. Es folgt dementsprechend die Korrelationsanalyse nach Spearman.

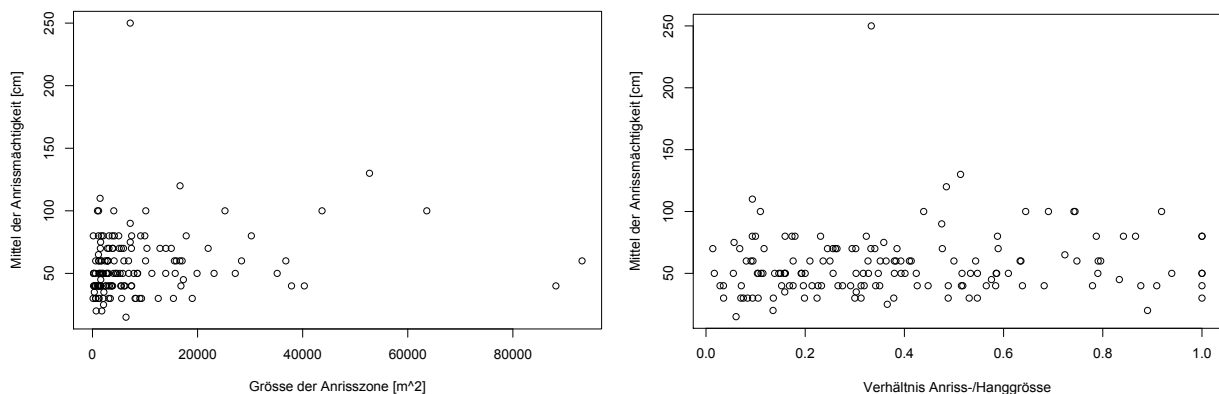


Abbildung 5.36: Mittel der Anrissmächtigkeit vs. Anrissgrösse und vs. Verhältnis der Grössen

Mit derselben Nullhypothese und gleichem Signifikanzniveau ergibt die Korrelationsanalyse folgende Resultate:

Test nach Spearman (N = 149)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Anrissgrösse – Anrissmächtigkeit (Mean)	0.006	0.223
Verhältnis Grössen – Anrissmächtigkeit (Mean)	0.090	0.138

Tabelle 5.13: Korrelationsanalyse Anrissgrösse/Verhältnis der Grössen – Mittelwerte Anrissmächtigkeit

Mit einer Signifikanz von 0.006 wird die  $H_0$ -Hypothese bei der Anrissgrösse abgelehnt, die Daten korrelieren. Die Korrelation fällt mit einem Wert von 0.223 etwas grösser aus als die Korrelation zwischen Anrissbreite und durchschnittlicher Anrissmächtigkeit, trotzdem herrscht immer noch eine

sehr geringe Korrelation. Mit einer Signifikanz von 0.090 wird die  $H_0$ -Hypothese beim Verhältnis der Grössen angenommen, die Daten korrelieren nicht.

Zusammenfassend tritt also bei den Anrisszonen und den Mittelwerten der Anrissmächtigkeit eine signifikante, allerdings sehr schwache Korrelation auf. Weder das Verhältnis der Breiten noch der Grössen korrelieren mit den Anrissmächtigkeiten. Folglich haben sich die Hänge nicht dem Verhältnis entsprechend ausgebreitet.

### 5.3.2 Maximalwerte der Anrissmächtigkeit

Hier folgen nun mögliche Zusammenhänge mit den Maximalwerten der Anrissmächtigkeit, also wird hier eine potentielle Korrelation zwischen Grösse/Breite und der dicksten Stelle beim Anriss untersucht.

#### Korrelationsanalyse Breite

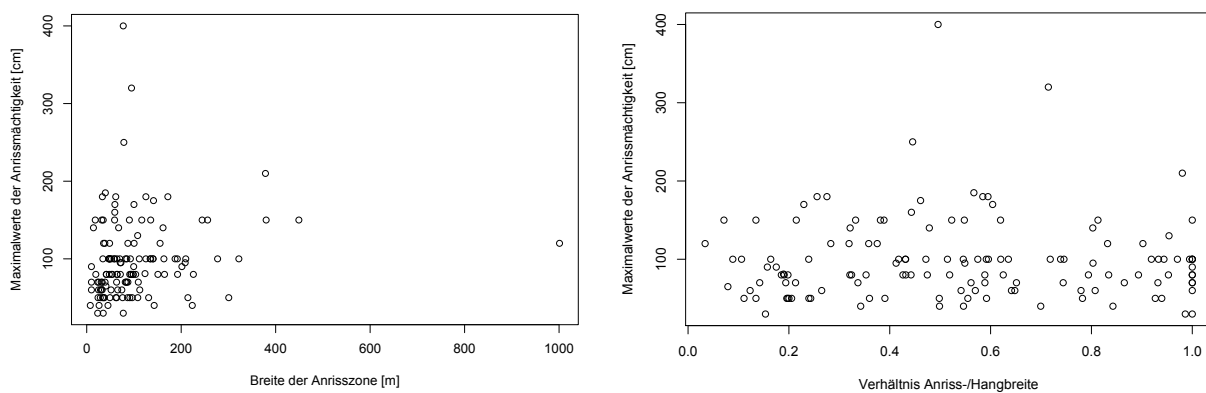


Abbildung 5.37: Maximum der Anrissmächtigkeit vs. Anrissbreite und vs. Verhältnis der Breiten

Beim Betrachten der Abbildung 5.37 scheint es, als ob im linken Plot ein Zusammenhang bestehen könnte. Dieser wird mit einem Signifikanzniveau von 0.002 in Tabelle 5.14 bestätigt. Allerdings fällt auch hier die Korrelation sehr gering aus mit einem  $r$  von 0.265.

Test nach Spearman (N = 133)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient $r$
Anrissbreite – Anrissmächtigkeit (Maximum)	0.002	0.265
Verhältnis Breiten – Anrissmächtigkeit (Maximum)	0.921	0.009

Tabelle 5.14: Korrelationsanalyse Anrissbreite/Verhältnis der Breiten – Maximalwerte Anrissmächtigkeit

Mit einem  $p$ -Wert von 0.921 wird auch hier eine mögliche Korrelation zwischen dem Verhältnis der Breiten und den Maximalwerten der Anrissmächtigkeit ausgeschlossen.

### Korrelationsanalyse Grösse

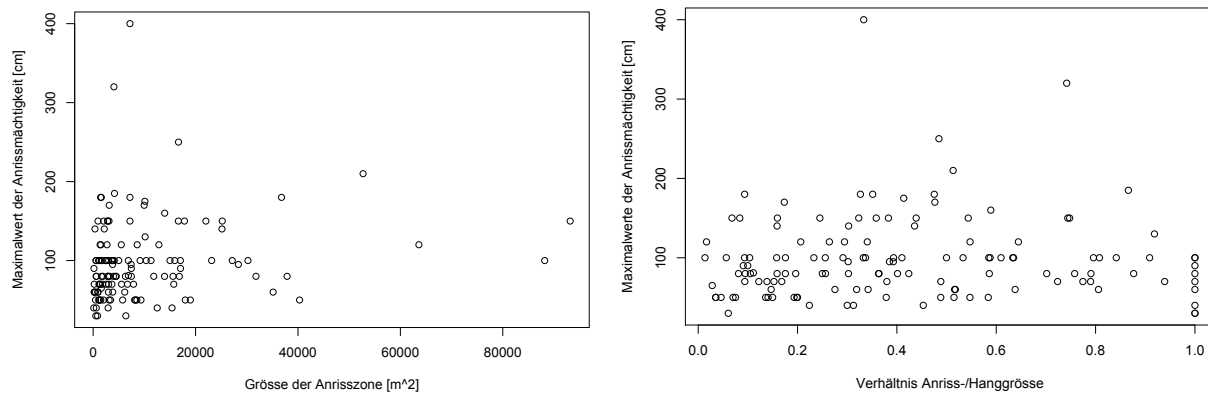


Abbildung 5.38: Maximum der Anrissmächtigkeit vs. Anrissgrösse und vs. Verhältnis der Grössen

Im linken Plot scheint eine leichte positive Korrelation zu herrschen. In Tabelle 5.15 wurde dies genauer untersucht.

Test nach Spearman (N = 133)		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Anrissgrösse – Anrissmächtigkeit (Maximum)	0.004	0.246
Verhältnis Grössen – Anrissmächtigkeit (Maximum)	0.309	0.089

Tabelle 5.15: Korrelationsanalyse Anrissgrösse/Verhältnis der Grösse – Maximalwerte Anrissmächtigkeit

Für die Anrissgrösse bestätigt sich die Vermutung, es herrscht eine geringe Korrelation von 0.246. Das Verhältnis der Anriss- zu Hanggrösse allerdings korreliert mit einem p-Wert von 0.309 nicht mit den Maximalwerten der Anrissmächtigkeiten.

### 5.3.3 Zusammenfassung Korrelationsanalyse mit der Anrissmächtigkeit

Hier sind die Resultate der verschiedenen Korrelationsanalysen dargestellt. Blau hinterlegte Zellen weisen signifikante Korrelation auf. In der Tabelle ist zu erkennen, dass die Anrisszonen immer mit der Anrissmächtigkeit korrelieren, die Anrisszonen/Hang-Verhältnisse allerdings nie. Die Korrelationskoeffizienten fallen aber so gering aus, dass die Zusammenhänge kaum relevant sind.

Test nach Spearman		
Variablen der Korrelationsanalyse	Signifikanz	Korrelationskoeffizient r
Anrissbreite – Anrissmächtigkeit (Mean)	0.027	0.181
Verhältnis Breiten – Anrissmächtigkeit (Mean)	0.362	0.074
Anrissgrösse – Anrissmächtigkeit (Mean)	0.006	0.223
Verhältnis Grössen – Anrissmächtigkeit (Mean)	0.090	0.138
Anrissbreite – Anrissmächtigkeit (Maximum)	0.002	0.265
Verhältnis Breiten – Anrissmächtigkeit (Maximum)	0.921	0.009
Anrissgrösse – Anrissmächtigkeit (Maximum)	0.004	0.246
Verhältnis Grössen – Anrissmächtigkeit (Maximum)	0.309	0.089

Tabelle 5.16: Zusammenfassung Korrelationsanalyse Anrissmächtigkeit

### 5.3.4 Gefahrenstufe

Im folgenden Kapitel werden die Resultate möglicher Zusammenhänge der Gefahrenstufe mit den Anrisszonen oder den Anrisszone/Hang-Verhältnissen aufgezeigt.

Es stellt sich die Frage, ob die bei Lawinenauslösungen vorherrschende Gefahrenstufe mit der Breite der Anrisszone selbst oder dem Verhältnis der Anriss- zu Hangbreite zusammenhängt. Im Folgenden sind mögliche Zusammenhänge geplottet.

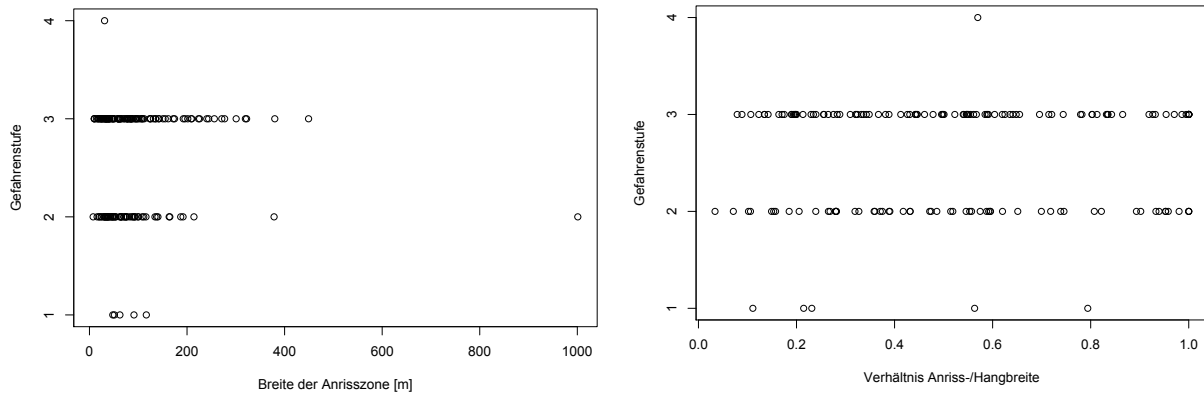


Abbildung 5.39: Gefahrenstufe vs. Anrissbreite und vs. Verhältnis der Breiten

In beiden Plots fällt auf, dass die Daten nur in den vier verschiedenen Stufen vorkommen, dass aber abgesehen davon keine Muster auftreten (zum Beispiel je höher die Stufe, desto breiter die Anrisszone). Um genauer zu untersuchen, ob die Gefahrenstufe mit der Anrissbreite und dem Verhältnis der Breiten zusammenhängt, wurden die einzelnen Gefahrenstufen zu Dummy-Variablen umkodiert. So konnte eine Regressionsanalyse mit den unabhängigen Variablen der verschiedenen Gefahrenstufen durchgeführt werden. Allerdings kamen dabei keine normalverteilten Residuen heraus, was als Modell-Voraussetzung gelten würde. Dem entsprach auch der p-Wert, welcher das Modell als nicht statistisch signifikant deklarierte. Auch wurde versucht, ein besseres Modell durch Transformation der Daten (siehe Kapitel 4.7.4) zu erreichen, dies nützte aber nichts.

Wie oben wurden ebenfalls die Variablen Anrissgrösse als auch Verhältnis der Grössen geplottet und für zweiteres eine Regressionsanalyse durchgeführt.

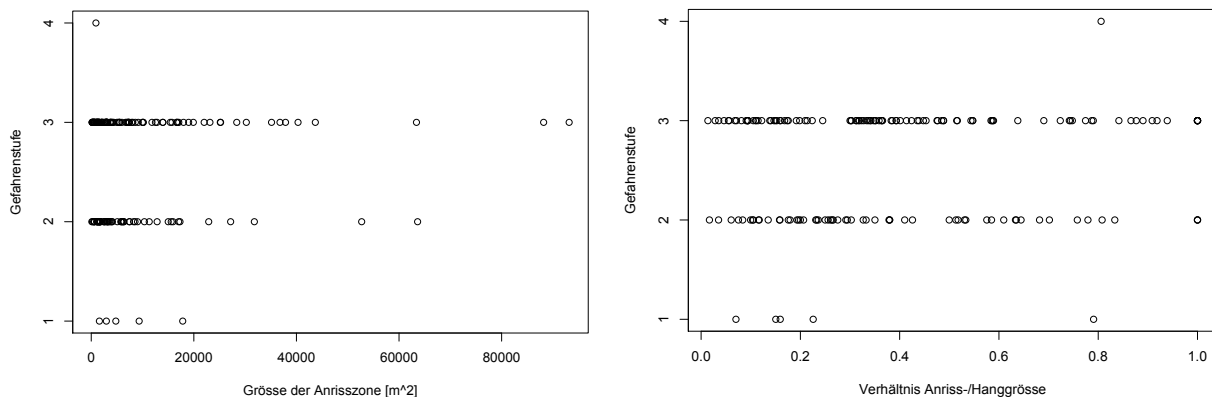


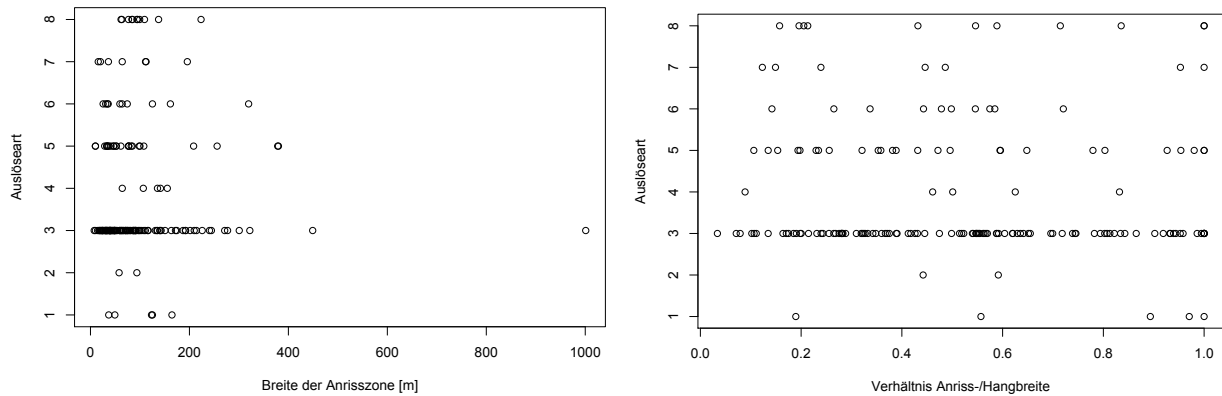
Abbildung 5.40: Gefahrenstufe vs. Anrissgrösse und vs. Verhältnis der Grössen

Doch auch hier wiesen die Residuen keine Normalverteilung auf und das Modell wurde für nicht genügend gut erklärt.

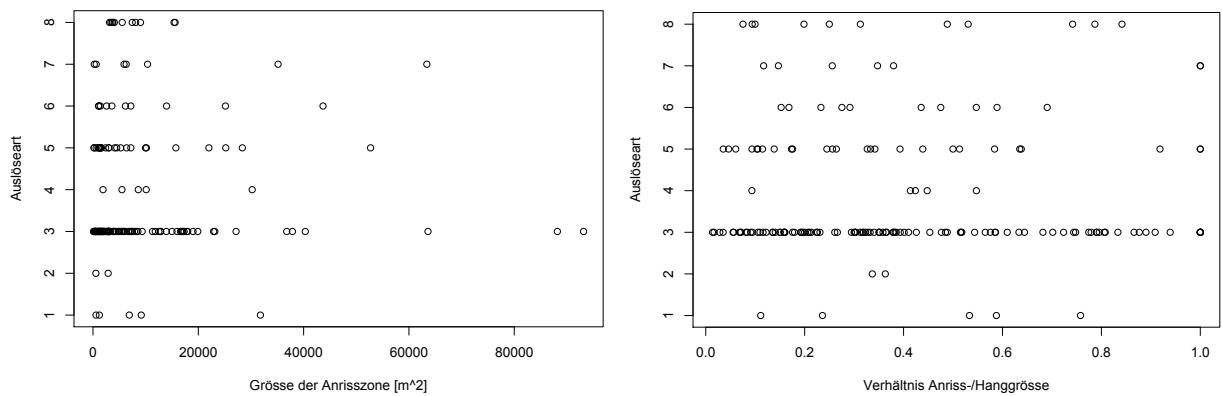
### 5.3.5 Auslöseart

Ob je nach Auslöseart unterschiedliche Anrissbreiten und -größen zu erkennen sind, sollte im Folgenden untersucht werden. Auch bestand die Möglichkeit auf einen Zusammenhang einer bestimmten Auslöseart zum Breiten- oder Größenverhältnis. Erwartet wurde zum Beispiel, dass möglicherweise Pistenfahrzeuge grössere und/oder breitere Anrisszonen auslösen oder dass ein potentieller Hang weitgehend ausgenutzt wird (→ Verhältnis nahe bei 1).

Folglich wurden im ersten Schritt die vier zu beschreibenden Variablen versus die Auslöseart geplottet.



**Abbildung 5.41: Auslöseart vs. Anrissbreite und vs. Verhältnis der Breiten**  
 (mit Auslöseart: 1 = Bergsteiger; 2 = Pistenfahrzeug; 3 = Ski; 4 = Ski/Snowboard; 5 = Snowboard; 6 = Schneeschuhläufer; 7 = natürlich; 8 = unsicher)



**Abbildung 5.42: Auslöseart vs. Anrissgrösse und vs. Verhältnis der Grössen**  
 (mit Auslöseart: 1 = Bergsteiger; 2 = Pistenfahrzeug; 3 = Ski; 4 = Ski/Snowboard; 5 = Snowboard; 6 = Schneeschuhläufer; 7 = natürlich; 8 = unsicher)

Wie bei der Gefahrenstufe sind abgesehen von der klaren Einteilung der Daten in acht Klassen keine Muster zu erkennen. Deshalb wurden auch diese als Dummy-Variablen in einer Regressionsanalyse getestet. Allerdings konnten auch hier weder mit den Rohdaten noch mit transformierten Daten normalverteilte Residuen als auch signifikante Modelle erreicht werden.



### 5.3.6 Multiple Regression

Obwohl anhand der oben aufgezeigten Plots bereits zu vermuten ist, und dies mit Hilfe der Korrelationsanalysen auch bestätigt wurde, dass zwischen den einzelnen Variablen keine Zusammenhänge bestehen, wurde versucht, das Verhältnis von Anriss- zu Hangbreite wie auch das Verhältnis von Anriss- zu Hanggröße durch die Variablen Anrissmächtigkeit, Hangneigung der Anrisszone (in dieser Arbeit ermittelte Daten), Gefahrenstufe und Auslöseart, oder durch eine Teilmenge davon, zu beschreiben. Dafür wurden Regressionsanalysen durchgeführt. Keine davon wies aber normalverteilte Residuen auf. Durch die Rohdaten konnte also kein geeignetes Modell zur Erklärung der Variablen des Verhältnisses von Anriss- zu Hangbreite oder Anriss- zu Hanggröße gefunden werden. Es erfolgte also die Transformation der Daten nach Tukey, um die Residuenanalyse zu verbessern und so ein geeigneteres Modell zu erzielen. Allerdings waren in den Plots trotz transformierter Daten immer noch keine Zusammenhänge zu erkennen. Dementsprechend konnten auch bei diesen p-Werten der Regressionsanalysen keine annähernd signifikanten Modelle ermittelt werden.

## 6 Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, Hänge rund um Anrisszonen zu extrahieren, ihre Eigenschaften zu eruieren und womöglich Gründe zu finden, weshalb die Anrisse sich dort nicht über die Hänge fortsetzen.

Es wurde eine in diesem Bereich neue Methode angewendet, um Hänge zu ermitteln, um anschliessend deren Merkmale aufzuzeigen sowie mögliche Zusammenhänge mit Werten aus der SLDB herzustellen.

Es stellt sich allerdings die Frage, ob die erhaltenen Ergebnisse durch bereits bekannte Arbeiten bestätigt werden können oder ob sich die jeweiligen Resultate massiv voneinander unterscheiden. Im zweiten Fall sollen mögliche Erklärungen für grosse Unterschiede gesucht werden. Als Problem stellt sich hierbei, dass noch in keiner Arbeit Hänge um Anrisszonen herum ermittelt wurden und dass Resultate dieser Arbeit folglich nicht mit denjenigen anderer Arbeiten verglichen werden können. Diejenigen Ergebnisse, bei welchen Vergleichsmöglichkeiten vorhanden sind, werden aber ausführlich diskutiert.

In den folgenden Abschnitten werden zuerst die erhaltenen Resultate genauer diskutiert und anschliessend im Kontext der in der Einführung genannten untergeordneten Fragen und zum Schluss im Kontext der Forschungsfrage betrachtet.

### 6.1 Eigenschaften von Anrisszonen und Hängen

#### Länge und Breite

Während bei Vontobel (2011) die Hälfte der Anrisszonen eine Breite von unter 65 m und eine Länge von unter 85 m aufweist, zeigt die Hälfte der in dieser Arbeit verwendeten Anrisszonen eine Breite kleiner als 73 m und eine Länge kleiner als 77 m auf. Dadurch, dass bei Schneebrettlawinen die Breite des Schneebrettes normalerweise grösser ist als die Länge (Delparte, 2008), ist eine Annäherung des Medians der Breite an jenen der Länge im Vergleich zu Vontobel (2011) zu erklären, obwohl auch in der vorliegenden Arbeit die Breite durchschnittlich kleiner ausfällt.

Schweizer & Jamieson (2000) und Schweizer & Jamieson (2001) untersuchten von Skifahrern verursachte Schneebretter in Kanada und in der Schweiz. Je nach Datensatz variierten die ermittelten Mediane für die Breite von Schneebrettern von 25 m bis 70 m. Bei Harvey (2002) ist der Median der Breite bei 60 m zu finden. Bei Schweizer & Lütshg (2001) liegt der Median der Breite über alle Fälle hinweg gesehen bei 50 m. Gemäss diesen Autoren muss allerdings je nach Tätigkeit unterschieden werden: Für Skifahrer, die neben markierten Pisten Lawinen verursachen, liegt der Median der Breite bei 40 m, während er für durch Skitourengänger ausgelöste Bretter bei 70 m liegt. Es scheint, je grösser die Breite, umso kleiner ist die Überlebenschance bei einer Lawine: Schneebretter, welche fatale Folgen mit sich bringen, weisen nach diesen Autoren einen Median von 80 m auf. Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Breiten scheinen folglich in den höheren Bereichen zu liegen, allerdings ist immer in Betracht zu ziehen, dass dies auch mit Ungenauigkeiten der Digitalisierung zusammenhängen kann.

Bei den Hängen fällt der Median der Breite nun tatsächlich grösser aus als jener der Länge. Dementsprechend sind die Regionen um die Anrisszonen mehr in die Breite als in die Länge gewachsen. Dies wäre ja eine gute Voraussetzung für Schneebretter mit grösserer Breite als Länge im Anriss, was nach Delparte (2008) ja normalerweise der Fall ist. Natürlich hängen diese Werte stark

mit der Wahl der Schwellenwerte zusammen. Lässt der Schwellenwert bei der Expositionsänderung mehr Variation zu als jener bei der Neigungsänderung, pflanzt sich ein Hang in horizontaler Richtung mehr und in vertikaler Richtung weniger fort. Hier das Gleichgewicht zu finden, dass sich Hänge sowohl in vertikale als auch horizontale Richtung etwa gleich ausbreiten können, stellte eine Herausforderung dar. Im Kapitel 4.3.3 wird genau diese Wahl der Schwellenwertsetzung kommentiert. Eine aussagekräftige Grösse stellt das Verhältnis von Anriss- zu Hangbreite dar. Je näher ein Werte an 1 liegt, desto eher kann das abrupte Enden von Anrisszonen im Hang durch markante Änderungen im Gelände erklärt werden. Bei kleinen Werten nahe 0 hingegen kann der Unterschied in der Breite nicht anhand des Geländes erklärt werden. Diese Differenzen sind wohl in der Schneedecke oder dem Wetter zu suchen.

### **Grösse**

Die Grössen der Anrisszonen variieren hier von 114.58 m<sup>2</sup> bis 93'161.17 m<sup>2</sup>. Da die Grösse einer Anrisszone in der Literatur eigentlich nur in Form der Breite und selten auch der Länge ausgedrückt wird, stehen hier keine Vergleichszahlen und -möglichkeiten zur Verfügung.

Die Hänge weisen Werte von 114.58m<sup>2</sup> bis 324'021.09m<sup>2</sup> auf. Zu erwähnen ist, dass sich vor allem kleine bis mittlere Lawinen aus dem Datensatz um markante Faktoren vergrössert haben (bis zu 72.98-mal die Grösse der Anrisszone). Grosse Anrisszonen weisen bereits viel Fläche auf und müssten deshalb sehr viel mehr an Grösse zulegen, um so enorm grosse Faktoren zu erreichen.

### **Neigung**

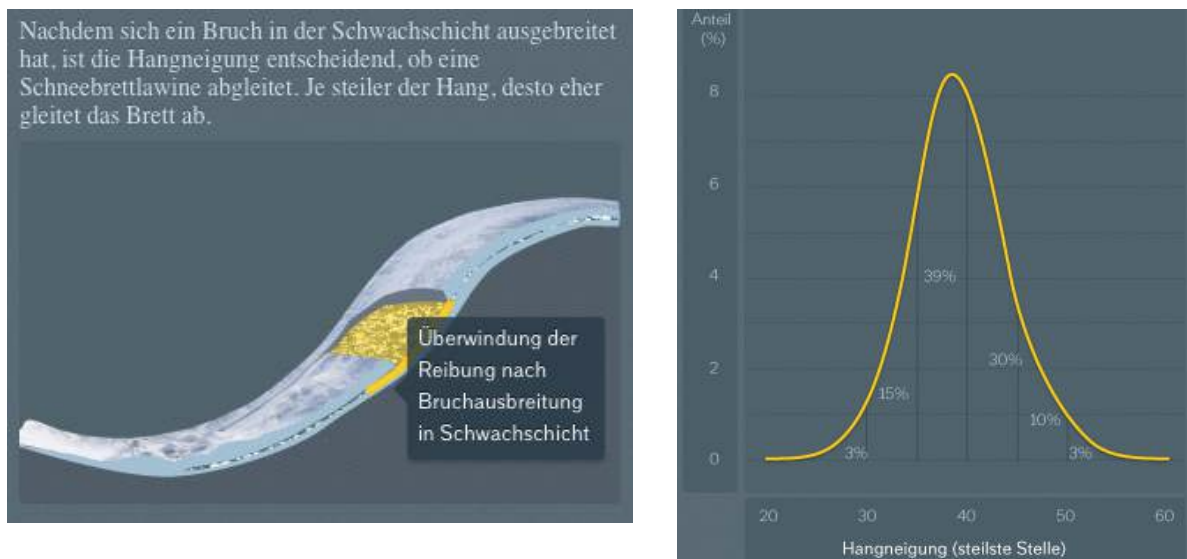
Die beobachteten Anrisszonen weisen bei maximaler Hangneigung einen Median von 42.98° und bei durchschnittlichen Werten einen Median von 35.65° auf.

Nach Schweizer & Lutschg (2001) ist der Median der Hangneigung über alle Fälle betrachtet (inklusive Lawinen, die neben Pisten oder auf Skitouren ausgelöst wurden) bei 38° zu finden, nach Schweizer & Jamieson (2000) tritt er bei durch Skifahrer ausgelösten Lawinen bei 39° auf. Diese Werte liegen beide zwischen dem Median der Durchschnittswerte und jenem der Maximalwerte dieser Arbeit und unterstreichen somit diese Resultate.

Die Hangneigung gilt bei der Bildung von Schneebrettern als Schlüsselfaktor, da jene entscheidet, ob aus einer gebrochenen Schwachschicht ein rutschendes Schneebrett entsteht oder nicht (vergleiche Abbildung 6.1, links) (SLF, o.J.-c). Die kritische Neigung liegt bei etwa 30° Hangneigung. Die durchschnittliche Hangneigung in Anrisszonen für typische Unfalllawinen ist bei rund 35° zu finden, die steilste Hangpartie tritt bei etwa 40° auf. Dementsprechend sind vor allem Hänge mit durchschnittlicher Hangneigung von 35° und mehr für Schneebrettauslösungen geeignet (SLF, o.J.-c). Diese Aussagen treffen ziemlich gut auf die Resultate dieser Arbeit zu, da viele Anrisszonen Durchschnittswerte um 35° herum aufweisen. Allerdings liegen die Maximalwerte etwas höher als wie vom SLF erwähnt bei 40°. Harvey, Rhyner, et al. (2012) stellen fest, dass die Auslösung von Schneebrettern meistens zwischen 35° und 45° Neigung stattfinden. Damit ist mehr Spannweite der vorliegenden Daten zu erklären. Allerdings existieren auch Maximalwerte unter 30° und über 60°, was laut Maggioni & Gruber (2003) nicht der möglichen Hangneigung bei Lawinenabgängen entspricht. Deshalb werden diese beiden Fälle hier genauer diskutiert:

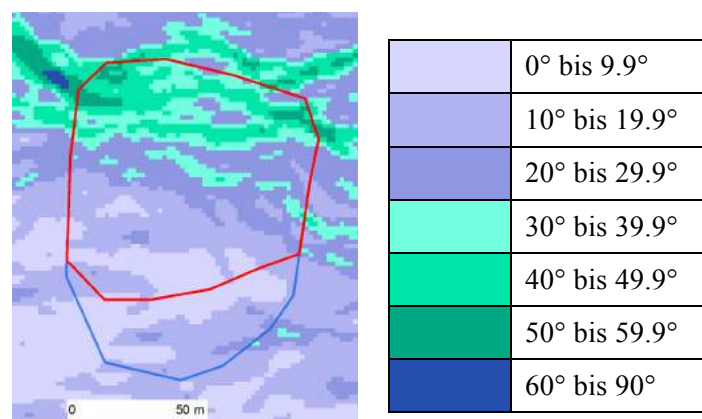
**Neigungswerte** ausschliesslich **unter 30°** sind bei drei Lawinen zu finden, ihre Maximalwerte liegen bei 27.2°, 28.1° und 29.6°. Auch bei näheren Untersuchungen können diese nicht auf

Digitalisierungsfehler zurückgeführt werden, da weit herum keine Hangneigung von über 30° zu finden ist.



**Abbildung 6.1:** Überwindung der Reibung bei Schneebrettern (links); Hangneigung bei typischen Unfalllawinen (rechts) (WhiteRisk, o.J.-d)

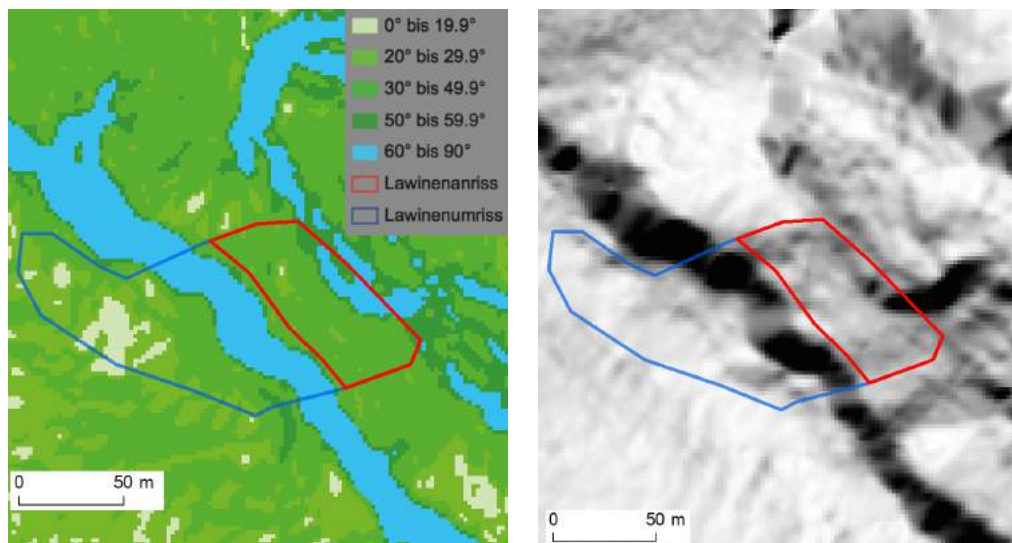
Wie in Abbildung 6.1 rechts zu erkennen ist, tritt ein sehr kleiner Prozentsatz von Unfalllawinen auch unterhalb von 30° Neigung auf. Ausserdem existieren auch Quellen, welche die Neigung von Anrisszonen ab 27° vorhersagen, allerdings ist da die Rede von Lawinen generell und nicht spezifisch Schneebrettlawinen (Ancey, 2001). In der vorliegenden Arbeit existieren neben den drei Maximalwerten selbstverständlich auch Minimal- und Durchschnittswerte unter 30°. Dort gilt das Gelände als zu flach, als dass Lawinen abgehen. Es sind einiges mehr an Pixeln in den Anrisszonen zu finden, welche Werte unter 30° als Werte über 60° aufweisen. Wie Vontobel (2011) mit ihren drei verschiedenen Untersuchungen in den Anrissgebieten (oben, Mitte, unten) zeigte, nimmt die Hangneigung in Anrisszonen in Fliessrichtung ab, was wiederum die konkave Profilkurvatur in Anrissgebieten widerspiegelt. Auch diese Anrisse mit Mittel- und Minimalwerten unter 30° wurden näher betrachtet. Bei einigen Anrissen gibt es nur ganz wenige von diesen Pixeln, bei anderen sind diese nur am unteren Ende zu finden, was die Ergebnisse von Vontobel (2011) bestätigt. Abbildung 6.2 zeigt so eine Neigungsabnahme. Am oberen Rand ist die Neigung über 30°, gegen unten hin flacht der Anriss ab.



**Abbildung 6.2:** Beispiel einer Neigungsabnahme in der Anrisszone

Neben solchen „idealen“ Neigungsabnahmen existieren aber auch Anrisszonen, welche verhältnismässig viele Pixel unter  $30^\circ$  aufweisen und diese treten auch am oberen Ende der Anrisszone auf, was der Literatur über Anrisszonen widerspricht. Dies kann möglicherweise mit ungenauen Digitalisierungen erklärt werden.

Auch auftretende **Maximalwerte über  $60^\circ$**  wurden näher untersucht, da diese nicht der Theorie entsprechen. Die hohen Maximalwerte stellen bei genauerer Betrachtung eine extreme Minderheit in den Anrisszonen dar, nur vereinzelte Pixel weisen Werte über  $60^\circ$  auf. Diese befinden sich entweder inmitten der Anrisszone, wo ein bisschen zu steile Werte wenig Einfluss haben, oder sie liegen ganz am Rand der Anrisszone, was eventuell mit ungenauen Digitalisierungen zusammenhängen kann.



**Abbildung 6.3: Ungenau digitalisierte Anrisszone**  
Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von Swisstopo

In Abbildung 6.3 ist so eine vermutlich ungenaue Digitalisierung zu erkennen. Am oberen Rand der Anrisszone würde nach dieser Digitalisierung eine Neigung von über  $60^\circ$  bestehen. Es ist allerdings zu vermuten, dass diese Anrisszone fälschlicherweise um einige Pixel zu weit nordöstlich digitalisiert wurde, da diese ja kaum inmitten einer Felswand startet. Zum besseren Verständnis und zur Lokalisierung der zu hohen Neigung wurde in blau ebenfalls der Umriss abgebildet.

Obwohl Schneebretter vermehrt in der Hangneigung  $35^\circ$  bis  $45^\circ$  auftreten, ist von  $30^\circ$  bis  $60^\circ$  alles möglich. Deshalb wurde dies als Schwellenwert im Algorithmus festgesetzt. Bei den Resultaten der Hänge fällt auf, dass sich jene diesen Grenzen zum Teil extrem angenähert haben.

### Exposition

Lawinen treten vermehrt an nördlich ausgerichteten Hängen auf. Dies hängt mit der Sonneneinstrahlung zusammen. Südhänge sind der Sonne viel stärker ausgesetzt, was zwischen Tag und Nacht zu grossen Temperaturschwankungen und dies wiederum zur Stabilisierung der Schneedecke führt. Da an Nordhängen im Winter kalte Temperaturen herrschen, können sich dort Schwachschichten bilden. Diese stehen in Zusammenhang mit der höheren Anzahl an Lawinen an Nordhängen verglichen mit jenen an Südhängen (Harvey, Rhyner, et al., 2012).

Im jahreszeitlichen Verlauf von Lawinenabgängen ist zu erkennen, dass die Nordexposition vor allem im Spätwinter dominiert. Dies geschieht, obwohl im späten Winter oder Frühling die Temperatur ansteigt und so die Stabilität an Schattenhängen verstärkt. Gleichzeitig werden sonnige Hänge instabil (Ancey, 2001) und an Südhängen steigt durch die starke Sonneneinstrahlung die Gefahr von Nassschneelawinen (WhiteRisk, o.J.-e). Vontobel (2011) erklärt die trotzdem vorhandene Mehrheit der Lawinenabgänge im Norden damit, dass vermutlich mehr Nordhänge befahren werden. An Südhängen herrscht ein grösseres Risiko, deshalb werden diese vermehrt gemieden und stattdessen Nordhänge bevorzugt, da dort die guten Schneesverhältnisse herrschen (Schweizer & Jamieson, 2000).

Die Hänge rund um die Anrisszonen weisen ebenfalls vermehrt nördliche Exposition auf. Diese ähnlichen Resultate entstanden durch den Parameter *erlaubte Spannbreite der Exposition*, da Hänge nicht unendlich um einen Gipfel herum wachsen sollten. Deshalb fallen die Unterschiede zwischen der Zuteilung zur Expositionsklasse der Anrisszone und derjenigen des Hanges relativ klein aus. Da die Exposition durch den Mittelwert repräsentiert wird, müsste für eine massive Änderung dessen – so dass dieser einer anderen Klasse zugeteilt würde – die Region entweder viele höhere oder aber viele tiefere Werte hinzufügen, also auf eine Seite wachsen, während die andere konstant bliebe. Da sich die Hänge aber üblicherweise in beide Richtungen ungefähr gleichmässig ausgedehnt haben, bleiben die Mittelwerte auch in etwa dieselben. Dies entspricht aber auch der Vorstellung, der Hang um die Lawine soll etwa dieselbe Exposition wie deren Anrisszone aufweisen.

### **Kurvatur**

Die Durchschnittswerte der Kurvatur ergeben, dass Lawinen gehäuft bei konkaver Profil- als auch Plankurvatur sowie in beide Richtungen gerade als auch bei konkaven Profil- und gerader Plankurvatur sowie beim umgekehrten Fall auftreten. McClung (2001) erhielt ähnliche Resultate: In Fliessrichtung kommen vermehrt konkave Geländeformen vor, welche Schneeansammlungen in Senken aufweisen können. In horizontaler Richtung allerdings sind die konkaven Formen noch viel ausgeprägter, was zusammen mit konkaver Profilkurvatur auf das Vorkommen von Mulden hinweist. Auch andere Autoren erwähnen die Verfrachtung des Schnees durch Wind von konvexen in konkave Gebiete (Delparte, 2008). Über die häufig auftretende konkave Plankurvatur scheint man sich in der Theorie einig zu sein, während mehrere Autoren Anrisszonen von Unfalllawinen vermehrt konvexer Profilkurvatur zuordnen (Schweizer et al., 2003; Ancey, 2001; Delparte, 2008). In der vorliegenden Arbeit wurde der Mittelwert für die Zuteilung der Geländeform verwendet, die Anrissstirn wurde nicht genauer untersucht. Vontobel (2011) bringt mit ihren Resultaten Klarheit: Um die Anrissstirn herum herrscht konvexe oder gerade Profilkurvatur, in weiterer Fliessrichtung verläuft das Gelände allerdings gerade oder konkav. Folglich finden Unfalllawinen häufig direkt unterhalb von Kämmen und Kuppen statt, wo das Gelände gerade oder konkave Profil- sowie Plankurvatur aufweist.

Da die Kurvatur als möglicher Schwellenwert im Algorithmus weggelassen wurde, konnten sich die Hänge in Bezug auf die Kurvatur unendlich ausbreiten. Auffällig ist, dass sich konkave als auch konvexe Gebiete (bei Profil- und Plankurvatur) vermehrt in Richtung 0 annähern. Genauer gesagt haben sich bei den Hängen 71.5% der Plankurvaturwerte und 73.3% der Profilkurvaturwerte näher zu Null hin verändert, verglichen mit den Kurvaturwerten bei den Anrisszonen.

Weiter zu diskutieren betreffend Kurvatur gibt die Auflösung des verwendeten DHMs. Hier gilt nicht „je genauer desto besser“. Für Werte wie die Kurvatur kann eine schlechtere Auflösung wie zum Beispiel 50 m besser sein, um eine globale Ansicht des Gebietes und nicht eine über kleinräumige

Phänomene zu bekommen (Maggioni & Gruber, 2003). Andere Autoren (Gruber Schmid & Sardemann, 2003) nennen als passende Auflösung 25 m bis 50 m. Im Kapitel Methodik wurde diese Thematik bereits angesprochen: Aufgrund einiger sehr kleiner Anrisszonen wurde doch die 10 m-Auflösung gewählt, obwohl diese dann möglicherweise auch zu kleine Phänomene mit in die Daten hineinnimmt.

### **Rauigkeit**

Die Rauigkeit des Bodens wurde in dieser Arbeit verwendet, um mögliche Anrissgebiete (= Hänge) von unmöglichen zu trennen. Die Bodenrauigkeit stellt nämlich einen Schlüsselfaktor dar (Ancey, 2001): Dichter Wald, sehr unebenes Gelände sowie Käme in Anrissgebieten mit viel Geröll verhindern grosse Ansammlungen von Schnee, welcher als Lawine enden könnte. Grosse, offene Hänge hingegen mit glattem Untergrund stellen mögliche Flächen für Anrisszonen dar. Die zu hohen Rauigkeitswerte wurden allerdings grösstenteils durch die Setzung des Schwellenwertes bereits vermieden, Wälder und raue Felskämme wurden ausgeschlossen. 87.8% der Anrisszonen bewegen sich vollständig im erlaubten Bereich der Rauigkeit, die restlichen Anrisse weisen vereinzelte Pixel mit zu hohen Werten auf. Dasselbe gilt dementsprechend für die Hänge. Diese haben die Spannweite der Werte im Bereich des Schwellenwertes etwas ausgedehnt, unterscheiden sich aber nicht massiv von den dazugehörigen Anrisszonen.

## 6.2 Evaluation der Hänge

### Einfluss der Parameter

Um den Einfluss der einzelnen Parameter auf das Resultat zu untersuchen, wurde der Algorithmus mehrmals durchgeführt, wobei jeweils ein einziger Parameter weggelassen wurde. So konnte der Einfluss des jeweiligen Schwellenwertes ermittelt werden. Die *Rauigkeit* macht kaum einen Anteil aus, die Regionen wären ohne jenen Parameter minim gewachsen. Ohne die Parameter *absolute* und *relative Neigung* sowie die *erlaubte Spannbreite der Exposition* wären die Regionen auf etwas mehr als das Eineinhalbfache gewachsen. Bereits diese Attribute weisen also eine Wichtigkeit auf, um Hänge vor dem Wachstum ins Unendliche zu bewahren. Eindeutig am meisten Einfluss hat die *Expositionsänderung*: Die Hänge würden ohne sie auf fast die doppelte Grösse ansteigen. Da Neigung sowie Exposition je zwei verschiedene Schwellenwerte aufweisen (relativ und absolut sowie relativ und erlaubte Spannbreite), wurde für diese dementsprechend ebenfalls der Einfluss als „Neigung respektive Exposition insgesamt“ ermittelt. Der Algorithmus wurde folglich einmal ohne beide Schwellenwerte der Neigung und einmal ohne jegliche Expositionsbegrenzung durchgeführt. Ohne die Neigungseinschränkung würden die Hänge eine dreimal so grosse Fläche abdecken, die Expositionseinschränkung hingegen verhindert Hänge, welche ungefähr 60-mal so gross wären. Diese Schwellenwerte waren also wichtig zu setzen, um die Hänge zu begrenzen.

### Compactness

Die Compactness dient als eine Art Beurteilung der Form von Anrisszonen und Hängen. Je näher an 1, als desto kompakter gilt eine Form (Bogaert et al., 2000). Die Werte der Anrisszonen variieren von 0.425 bis 0.966, jene der Hänge von 0.195 bis 0.926. Es ist zu erkennen, dass einige Anrisszonen als auch Hänge erstaunlich hohe Werte aufweisen, weil sie annähernd perfekte Kreise darstellen. Werden die Anrisszonen mit den Hängen verglichen, ist die Kompaktheit bei zweiteren meistens schlechter.

Durch das Wachsen der Hänge entstehen viele Einbuchtungen, Anhängsel und auch länglichere Formen. Im Vergleich dazu sind die digitalisierten Anrisszonen relativ kompakt, womit diese Unterschiede in der Compactness zu erklären sind.

### Subjektive Beurteilung

Je nach Empfinden wurden bei dieser Evaluationsmethode die erhaltenen Hänge in die Klassen „gut“, „mittel“ und „schlecht“ eingeteilt. Die Methode der subjektiven Beurteilung unterscheidet sich nicht wesentlich von der *Compactness*, der markanteste Unterschied ist, dass länglichere kompakte Formen nicht von vornherein schlechter empfunden werden als runde Formen. Damit sind auch die Unterschiede der Resultate zu jenen der *Compactness* zu erklären (siehe Abbildung 5.34). Tiefe Compactness-Werte werden subjektiv gelegentlich als „mittel“ angeschaut und nicht der schlechtesten Klasse zugeteilt. Dies hängt einerseits mit einer länglichen Form zusammen und andererseits mit vielen, jedoch kleinen Einbuchtungen, die das Auge nicht gross stören. Durch diese Einbuchtungen und dadurch längere Umrisse sowie die länglichere Form wird diesen Hängen allerdings ein sehr tiefer Compactness-Wert zugewiesen.



### 6.3 Frage 1: Extraktion von Hängen rund um Anrisszonen

#### Wie können Hänge definiert und folglich aus einem DHM extrahiert werden?

Es spielen viele Faktoren mit hinein bei der Beurteilung, was als potentieller Hang für mögliche Lawinenabgänge angesehen werden kann. In dieser Arbeit wurde in einem ersten Schritt die mögliche Definition eines Hanges untersucht. Beim Einzeichnen von potentiellen Hängen um Anrisszonen wurde schnell klar, dass diese Methode gewöhnliche Hänge ermittelt und nicht explizit solche, welche für Lawinenauslösungen optimale Eigenschaften aufweisen. Deshalb sollten die lawinenrelevanten Parameter bestimmt und anschliessend in einen Algorithmus eingebaut werden, welcher solche potentiellen Hänge für Lawinenabgänge automatisch ermittelt und anschliessend aufzeigt.

Um also Hänge zu extrahieren, unabhängig von Wetter (Schnee und Wind) und Saison, wurden nur Parameter einbezogen, die das ganze Jahr durch dieselben bleiben. Folgende beständige Faktoren scheinen wichtig: Distanz zum Kamm, Exposition, Profilkurvatur, relative Höhe (Guy & Birkeland, 2013), Neigung, Wald, Plankurvatur (Maggioni & Gruber, 2003) sowie die Bodenrauigkeit (Ancey, 2001).

Da für den Algorithmus bereits bestehende Seedpixel (Anrisszonen) vorhanden sind, ist die Distanz zum Kamm dadurch entweder gegeben oder nicht. Falls die Lawine weiter weg von einem Kamm stattgefunden hat, soll sich der Hang rundherum allerdings nicht anders ausbreiten als in der Nähe eines Kammes. Deshalb wurde dieser Faktor ausser Acht gelassen. Die Exposition wurde in einem ersten Schritt als relative Exposition einbezogen, um als Abbruchkriterium das Wachsen von Hängen bei schnell wechselnder Exposition, was Käme oder Schluchten darstellt, zu beenden. Um der Möglichkeit entgegenzuwirken, dass Hänge bei kleiner Expositionsänderung ständig weiterwachsen, wurde ebenfalls pro Lawine eine erlaubte Spannweite für die Exposition eingeführt, welche auf der Verteilung der Expositionswerte (Mittelwert und Standardabweichung) innerhalb der Anrisszone basiert. Der Faktor Exposition wurde also durch zwei verschiedene Parameter einbezogen. Die Profil- sowie Plankurvatur wurden als Parameter weggelassen, da bereits die Verteilung innerhalb der Anrisszonen aufzeigte, dass sehr grosse Spannweiten bei den Kurvaturwerten herrschen und diese zu begrenzen fast unmöglich ist. Ausserdem wird bei grossflächigen Änderungen der Kurvatur das Wachsen der Hänge bereits durch Parameter wie die Expositions- oder Neigungsänderung begrenzt. Guy & Birkeland (2013) haben für ihre Ermittlung von möglichen Anrissgebieten die relative Höhe verwendet, was das Verhältnis zwischen absoluten Höhen von Nachbarn darstellt. Nicht mit Höhen- sondern Neigungswerten wurde dasselbe für diese Arbeit hier gemacht, um wie bei der Exposition schnell sich änderndes Gelände auszuschliessen. Laut Maggioni & Gruber (2003) erstreckt sich die mögliche Neigung für potentielle Anrissgebiete von 30° bis 60°, was ebenfalls als Faktor einbezogen wurde. Des Weiteren stellt sich die Frage, ob Wald oder kein Wald vorhanden ist. Da ebenfalls der Parameter Rauigkeit einbezogen wird, wurde Wald als zu raues Gelände durch das Kriterium „Rauigkeit“ gesteuert. Sowohl Wald als auch zu raue Gebiete in felsigem Gelände sollen nicht zu möglichen Anrissgebieten dazu genommen werden, da nach Ancey (2001) dichter Wald wie auch sehr unebenes Gelände kaum Schnee ansammeln und daher keine Lawinen verursachen können.

Als Methode, diese Hänge zu extrahieren, wurde ein Region-Growing-Ansatz gewählt. Dieser wird oft zur Extraktion von geomorphologischen Phänomenen verwendet (Etzelmüller et al., 2007; Jellema et al., 2009; Schmid, 2014; Straumann, 2010). Dabei wird die Nachbarschaft einbezogen, sodass jedes Pixel einerseits den absoluten als auch den relativ zum Nachbarn gesetzten Schwellenwerten

standhalten muss. So wachsen Regionen rund um die bereits bestehenden Zonen (hier Anrisszonen), welche als Seedpixel verwendet wurden, bis keine Pixel mehr zu den Regionen hinzugefügt werden. In der vorliegenden Arbeit resultiert pro Anrisszone eine Region, welche den Hang rund um die Anrisszone darstellt.

Allerdings ist zu bedenken, dass die gesetzten Schwellenwerte einen riesigen Einfluss auf die Resultate haben. Es stellt sich also die Frage, ob die Schwellenwerte dem Zweck entsprechend richtig gesetzt wurden. Bei der Betrachtung der einzelnen Hänge fällt auf, dass einige kaum grösser als die Anrisszonen selber ausfallen, während sich bei anderen eine massive Zunahme ergibt. Es ist zu bemerken, dass einige Regionen vom subjektiven Standpunkt her betrachtet zu viele Pixel als zum Hang gehörend klassieren. Hätten folglich die Schwellenwerte einschränkender gesetzt werden müssen? Bei der genaueren Betrachtung dieser zu gross gewachsenen Regionen ist zu erkennen, dass jene über einzelne Nachbarn zwischen Kämmen (zum Beispiel bei kleinen Pässen) hindurch gewachsen sind. Würden die Schwellenwerte aber noch mehr Gebiete ausschliessen, würden die Ergebnisse jedoch vorwiegend die Anrisszone selbst widerspiegeln, was ja nicht die Idee dieser Arbeit repräsentiert.

Im Grossen und Ganzen sind die Hänge etwa so herausgekommen wie erwartet. Die Schwellenwertsetzung und ihre Ergebnisse können also nicht grundlegend falsch sein. Die Evaluation der Hänge mittels *Compactness* zeigt, dass Hänge durch das Wachsen in den meisten Fällen an Kompaktheit verlieren.

## 6.4 Frage 2: Möglichkeiten und Schwierigkeiten der Hang-Extraktion

### Wo liegen die Möglichkeiten und Schwierigkeiten einer automatischen Hang-Extraktion?

Während andere Arbeiten (Maggioni & Gruber, 2003; Maggioni et al., 2002; Maggioni, 2004) mögliche Anrisszonen für Lawinen ermitteln, liegt der Fokus in dieser Arbeit nicht auf der Ermittlung, sondern auf der Untersuchung der näheren Umgebung von bereits vergangenen Lawinenereignissen. Bei den oben genannten Arbeiten wird zu möglichen Anrisszonen hineingezoomt, in dieser Arbeit hingegen findet ein Herauszoomen von den eigentlichen Anrisszonen auf deren Hänge statt. Die Idee in der Untersuchung der Hänge liegt darin, dass durch jene Eigenschaften möglicherweise Zusammenhänge zu bereits bestehenden Daten aus der SLDB zu erkennen sind und damit Gründe gefunden werden können, warum jene Teile des Hanges nicht zur Anrisszone dazugehörten. Die positiven Eigenschaften dieser Methode liegen darin, dass sie in einem objektiven Rahmen stattfindet, folglich immer dieselben Werte hinzufügt und andere von der Region ausschliesst (Schmid, 2014). Ausserdem liefert diese Methode eine Basis, in welche weitere Faktoren wie Wind und Schneedecke eingebaut werden könnten, um weiterführende Informationen über die Hänge rund um Anrisszonen zu erhalten. Somit könnten die Resultate dann auch zur Informationsbeschaffung vor Skitouren und dem Freeriden dienen, indem genauere Erkenntnisse über die Eigenschaften von Hängen rund um Anrisszonen bestehen.

Es ist klar, dass ein Modell nie die Realität abbilden kann (Schmid, 2014). Zudem erfolgt bei dieser Methode die Schwellenwertsetzung subjektiv, was den oben genannten objektiven Rahmen relativiert. Die Setzung der Schwellenwerte war entsprechend schwierig, da die Balance zwischen zu viel und zu wenig möglichem Zuwachs gefunden werden musste. Eine weitere Herausforderung war jene, dass die Parameter miteinander interagieren und also die passende Kombination zu finden nicht ganz einfach erscheint (Eiben et al., 1999). Im Gegensatz zu Schmid (2014) wurden in dieser Arbeit die Seeds nicht automatisch gefunden, was mühsame Handarbeit bedeutete. Die grössten Schwierigkeiten bereiteten vereinzelte Regionen, welche sich über mehrere einzelne Pixel massiv ausdehnten, so dass ein grosser Teil des Hanges nur über einzelne Pixel in Verbindung zur Anrisszone stand. Da dies aber nur bei sehr wenigen Hängen eintrat, wurde diese Methode trotzdem beibehalten. Für künftige Arbeiten existieren aber Verbesserungsvorschläge (siehe Kapitel 7.3).

## 6.5 Frage 3: Zusammenhänge der generierten Daten und der SLDB

### Inwiefern sind Zusammenhänge zwischen den generierten Daten und den schon bestehenden Daten (SLDB) erkennbar?

Um zu ermitteln, ob Anrisszonen oder allenfalls das Verhältnis von Anrisszonen zu Hängen (sowohl in Breite als auch Grösse), bessere Rückschlüsse zulassen, wurden diese mit bereits bestehenden Daten aus der SLDB auf mögliche Zusammenhänge getestet.

In einem ersten Schritt wurden die Anrisszonen selbst sowie auch die Verhältnisse von Anrisszonen zu Hängen auf Korrelation zu Anrissmächtigkeiten laut SLDB untersucht. Die Überlegung dahinter war, dass möglicherweise je dicker die Anrissmächtigkeit, desto eher würde die gesamte mögliche Hangfläche als Anrisszone verwendet (folglich wäre das Anriss/Hang-Verhältnis nahe bei 1). Allerdings wurden durch die Korrelationsanalyse keine Zusammenhänge zwischen der Anrissmächtigkeit und den Breiten- respektive Grössenverhältnissen bestätigt. Dagegen wurden aber signifikante Korrelationen zwischen den Anrisszonen und Anrissmächtigkeiten ermittelt, welche jedoch gemäss dem Korrelationskoeffizienten so gering ausfallen, dass sie praktisch zu vernachlässigen sind.

Es wurden auch mögliche Thesen zur Gefahrenstufe aufgestellt: Je höher die Gefahrenstufe, desto eher wird die gesamte mögliche Fläche als Anrisszone miteinbezogen. Doch weder mit den Anrisszonen selber als auch mit dem Verhältnis von Anriss zu Hang konnten Zusammenhänge zur Gefahrenstufe hergestellt werden.

Verursachen Pistenfahrzeuge grössere/breitere Anrisszonen als Bergsteiger? Dies sollte anhand der Auslöseart von Lawinen untersucht werden. Allerdings waren auch da keine Muster zwischen der Auslöseart und der Breite respektive Grösse von Anrisszonen zu finden.

Ob sich das Breiten- oder Grössenverhältnis von Anrisszonen zu Hängen anhand mehrerer unabhängiger Variablen beschreiben lässt, sollte in einem letzten Schritt mit der Regressionsanalyse ermittelt werden. Zu den oben genannten, bereits einzeln untersuchten Variablen aus der SLDB kam noch die Hangneigung aus den in dieser Arbeit verwendeten Anrisszonen hinzu. Bei der Durchführung der Regressionsanalyse konnten allerdings keine normalverteilten Residuen erzielt werden. Nach Stahel (2013) kann durch Transformation der Daten nach Tukey die Residuenanalyse verbessert werden, was zu einem gut angepassten Modell führen kann. Trotz Transformation der Daten konnte allerdings kein Modell gefunden werden, das eine der abhängigen Variablen sinnvoll beschreibt.

Zusammenfassend sind folglich nur signifikante Zusammenhänge zwischen den Anrisszonen und der Anrissmächtigkeit vorhanden, diese sind allerdings aufgrund der Schwäche der Korrelation vernachlässigbar. Korrelationen zwischen dem Verhältnis von Anriss zu Hang und den Werten aus der SLDB konnten keine gefunden werden. Dies kann entweder auf die Begrenzung der Hangausbreitung, also auf die Schwellenwertsetzung, zurückgeführt werden oder aber es gibt tatsächlich keine Zusammenhänge zu finden.

## 6.6 Forschungsfrage: Hänge rund um Anrisszonen

### **Warum existieren Lawinen, deren Anriss mitten im Hang endet und nicht den Hang rundherum einbezieht, obwohl dieser ähnliche Geländeeigenschaften aufweist?**

Die in dieser Arbeit ermittelten Hänge weisen ähnliche Gelände-Eigenschaften auf wie die dazugehörigen Anrisszonen, wurden aber dennoch beim Abgang der Lawine nicht miteinbezogen. Warum dies so ist, scheint sehr schwer zu beantworten und nach eingehender Analyse muss davon ausgegangen werden, dass dies alleine aufgrund der Geländeparameter nicht möglich ist. Da als wichtige Gründe für Lawinenabgänge wechselnde Wetterbedingungen wie Neuschnee, Wind, Regen sowie Veränderungen in der Schneedecke gelten (Ancey, 2001), müssten zur Beantwortung oben genannter Frage wohl diese Parameter ebenfalls einbezogen werden. Diese würden wetter- und saisonbedingt unterschiedliche Ergebnisse hervorbringen (Guy & Birkeland, 2013). Einige Arbeiten haben den Einfluss auf Lawinen durch Wind aufgezeigt, indem mögliche Schneeverwehungen einbezogen wurden (Delparte, 2008; Ancey, 2001; Gruber Schmid & Sardemann, 2003). Nach Schweizer et al. (2003) trägt als aktivster Faktor Neuschnee, gefolgt vom Faktor Wind zur Lawinenbildung bei. Auch die Schneedecke und ihr Einfluss auf die Lawinengefahr wurde mehrfach untersucht (Steinkogler et al., 2014; Schweizer & Jamieson, 2001; Guy & Birkeland, 2013). Obwohl die gestellte Forschungsfrage hier letztlich nicht beantwortet werden kann, ist mit dieser Arbeit doch eine gute Basis geschaffen. Mit zusätzlichem Einbezug von Parametern wie Schneedecke und Wind lässt sich möglicherweise die Forschungsfrage beantworten. In dieser Arbeit konnten Hänge sowie ihre Eigenschaften rund um Anrisszonen extrahiert werden mit Hilfe einer Methode, die sonst in der Geomorphologie bei der Extraktion von Geländeformen Anwendung findet (Etzelmüller et al., 2007; Straumann, 2010; Schmid, 2014). Es wurde folglich eine in der Geomorphologie übliche Methode auf den Bereich der Lawinen übertragen, um die Eigenschaften von Hängen zu extrahieren und diese mit den zugehörigen Anrisszonen zu vergleichen.

## 7 Schlussfolgerungen

In dieser Arbeit wurden Hänge rund um Anrisszonen aus einem DHM extrahiert, deren Eigenschaften aufgezeigt und Gründe gesucht, warum jenes Gelände bei Lawinenniedergängen nicht betroffen war. In den folgenden Abschnitten soll aufgezeigt werden, welche Arbeitsschritte vollzogen wurden, welche Erkenntnisse gewonnen werden konnten und in welche Richtung künftige Forschung auf diesem Gebiet gehen könnte.

### 7.1 Arbeitsprozess

In dieser Arbeit wurde/n:

- auf der Methodik von Vontobel (2011) basierend mit Hilfe von Fotos und Kartenmaterial weitere Anrisszonen digitalisiert.
- anhand der Schwellenwertsetzung der einzelnen Parameter eine mögliche Definition für Hänge rund um Anrisszonen gefunden.
- der in Python implementierte Algorithmus von Schmid (2014) übernommen und an vielen Stellen ausgebaut und angepasst, um Hänge rund um Anrisszonen aus einem DHM zu extrahieren.
- die Eigenschaften von Anrisszonen wie auch diejenigen von den zugehörigen Hängen für den gesamten Schweizer Alpenraum ermittelt und miteinander verglichen.
- die erhaltenen Hänge aufgrund von drei unterschiedlichen Methoden evaluiert.
- Zusammenhänge zwischen den erhaltenen Hängen und den bereits bestehenden Werten aus der Schadenlawinendatenbank gesucht.
- die erhaltenen Resultate mit bereits bekannten Werten aus der Literatur diskutiert und bei grösseren Unterschieden mögliche Gründe für diese genannt.

### 7.2 Erkenntnisse

Die wohl wichtigste Erkenntnis in dieser Arbeit liegt darin, dass anhand von Geländeparametern allein nicht erklärt werden kann, warum die Hänge rund um Anrisszonen – obwohl je mit ähnlichen Eigenschaften – nicht auch in eine abgehende Lawine integriert wurden, sondern dass dafür weitere Faktoren (wie die Beschaffenheit der Schneedecke oder der Wind) relevant sind.

Die Eigenschaften der Anrisszonen unterscheiden sich trotz viel grösserem Untersuchungsgebiet nur wenig von den Ergebnissen bei Vontobel (2011). Die in dieser Arbeit untersuchten Unfalllawinen weisen im Mittel Anrissbreiten von 73 m und Anrisslängen von 77 m auf, die durchschnittliche Neigung beträgt um die 35°, vermehrt sind die Anrisszonen an Hängen mit nördlicher Ausrichtung zu finden und sie treten vorwiegend an planaren und konkaven Hängen direkt unterhalb von konvexen Geländeformen auf.

Durch die Schwellenwertsetzung wurde bestimmt, dass nur Pixel, die bezüglich ihren Eigenschaften sehr ähnlich sind, zu den Regionen hinzugefügt werden dürfen; dementsprechend unterscheiden sich die Resultate der Anrisszonen und Hänge nicht wesentlich. Offensichtlich ist, dass sich die Werte der Hänge in der erlaubten Spannweite des Öfteren bis zum Minimum respektive Maximum ausgebreitet haben.

Die Schwellenwertsetzung stellte eine schwierige Aufgabe dar. Die Herausforderung war, das Gleichgewicht zu finden, dass zwar möglichst viele Pixel innerhalb der durch Kämme beschränkten Hänge als ähnlich erkannt wurden und trotzdem nicht so viele, als dass sich jene über Kämme und Täler hinfortpflanzen konnten. Trotz grosser Investition an Zeit und Geduld sind vereinzelte Hänge entstanden, die sich genau so über einzelne Pixel fortpflanzten. Das dürfte eigentlich nicht passieren, ist aber mit diesem Ansatz nicht zu vermeiden.

Mit dieser Methode ist eine Extraktion von Hängen rund um Anrisszonen durchführbar, solange bereits definierte Seedpixel (in diesem Fall die Anrisszone) als Input dienen.

Die Ergebnisse der erhaltenen Hänge zeigen massive Unterschiede in Form und Grösse. Einige haben kaum an Grösse zugelegt, während andere bis um das 73-fache gewachsen sind.

Mit Hilfe der verwendeten Methode wurden Hänge rund um Anrisszonen extrahiert, die Eigenschaften der Anrisszonen und der Hänge ermittelt und verglichen. Diese Arbeit liefert eine gute Basis für weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet unter Einbezug weiterer Faktoren.

### 7.3 Ausblick

Die Erforschung von lawinenbildenden Faktoren und deren Interaktion wird auch weiterhin ein wichtiges Thema bleiben. Diese Arbeit konnte einen kleinen Teil dazu beitragen, mögliche Hänge rund um Anrisszonen herum zu definieren, was zum besseren Verständnis von Unfalllawinen dienen kann. Weitere Erforschung der Thematik Hänge um Anrisszonen ist dafür aber unerlässlich.

Wie bereits mehrfach erwähnt, würde es sich lohnen, auf diesem Ansatz basierend die Faktoren Wind und Schneedecke einzubeziehen. Der Faktor Wind könnte auf einfache Art und Weise mit lokalen Stürmen oder auch genauer je nach lokal vorhandener Geländeform einbezogen werden. Die Informationen über die Schneedecke sind vermutlich nur grossräumig bekannt, es kann lediglich die damals vorherrschende Lage ermittelt werden. Ebenfalls könnte eine Methode entwickelt werden, in welche auch die Krümmung miteinbezogen würde.

Um Regionen zu vermeiden, welche sich über vereinzelte Pixel fast endlos fortpflanzen, könnte im Algorithmus eine Bedingung eingefügt werden, welche das Wachsen von Regionen nur zulässt, wenn dies über mehrere Pixel passiert. Folglich würde diese als Abbruchkriterium dienen, falls sich die Region über einzelne Pixel ausbreiten wollte. Eine zweite Möglichkeit wäre das Einfügen eines Algorithmus am Ende des Region-Growings, welcher die Resultate der Regionen je nach Form derselben in unterschiedliche Gebiete aufteilt. So könnten überflüssige Anhängsel, welche fälschlicherweise zur Region dazugenommen wurden, in einem zweiten Schritt vom Hang wieder entfernt werden.

Der Einfluss unterschiedlicher Auflösungen wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Möglicherweise könnte deren Analyse spannende Ergebnisse mit sich bringen.

## Literatur

- Adams, R. & Bischof, L. (1994). Seeded region growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 16(6): 641–647.
- Ancey, C. (2001). Snow Avalanches. In N. J. Balmforth & A. Provenzale (eds.), *GEOMORPHOLOGICAL FLUID MECHANICS* (Vol. 582.). Springer.
- Baatz, M. & Schäpe, A. (2000). Multiresolution Segmentation : an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 58(3-4): 12–23.
- Blaschke, T. (2010). Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(1): 2–16. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>
- Bogaert, J., Rousseau, R., Van Hecke, P. & Impens, I. (2000). Alternative area-perimeter ratios for measurement of 2D shape compactness of habitats. *Applied Mathematics and Computation* 111: 71–85.
- Cavalli, M. & Marchi, L. (2008). Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Science* 8: 323–333.
- Deems, J.S., Birkeland, K.W. & Hansen, K.J. (2002). *Topographic influence on the spatial patterns of snow temperature gradients in a mountain snowpack*. International Snow Science Workshop, Penticton, British Columbia.
- Delparte, D.M. (2008). *Avalanche Terrain Modeling in Glacier National Park, Canada*. University of Calgary.
- Dikau, R. (1989). The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In J. Raper (ed.), *Three-dimensional Applications in Geographical Information Systems*. London: Taylor & Francis.
- Dobbertin, M.K. (2013a). Wie hoch liegt die Waldgrenze? *Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL*. Retrieved 1 January 2016, from [http://www.wsl.ch/school/kids/waldoekosysteme/hoeh\\_e\\_waldgrenze/index\\_DE](http://www.wsl.ch/school/kids/waldoekosysteme/hoeh_e_waldgrenze/index_DE)
- Dobbertin, M.K. (2013b). Warum wächst der Wald nur bis zu einer bestimmten Höhe? *Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL*. Retrieved 1 January 2016, from [http://www.wsl.ch/school/kids/waldoekosysteme/waldgrenze/index\\_DE](http://www.wsl.ch/school/kids/waldoekosysteme/waldgrenze/index_DE)
- Duque, J.C., Ramos, R. & Surinach, J. (2007). Supervised Regionalization Methods: A Survey. *International Regional Science Review* 30(3): 195–220.
- Eclipse. (o.J.). About the Eclipse Foundation. Retrieved 23 December 2015, from <http://www.eclipse.org/org/#about>
- Eiben, E., Hinterding, R., Michalewicz, Z. & Member, S. (1999). Parameter Control in Evolutionary Algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 3(2): 124–141.
- Esri. (2012a). Funktionsweise des Werkzeugs ‘Neigung’. Retrieved 15 October 2015, from <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z000000vz000000/>
- Esri. (2012b). Funktionsweise des Werkzeugs ‘Ausrichtung’. Retrieved 16 October 2015, from <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z000000vp000000/>
- Esri. (2012c). Funktionsweise des Werkzeugs ‘Krümmung’. Retrieved 11 November 2015, from <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/na/009z000000vs000000/>



- Esri. (2012d). Krümmung (Spatial Analyst). Retrieved 11 November 2015, from <http://help.arcgis.com/de/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#//009z000000tw000000>
- Etzelmüller, B., Romstad, B. & Fjellanger, J. (2007). Automatic regional classification of topography in Norway. *Norwegian Journal of Geology* 87: 167–180.
- Gruber Schmid, U. & Sardemann, S. (2003). High-frequency avalanches: release area characteristics and run-out distances. *Cold Regions Science and Technology* 37(3): 439–451. Retrieved from <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0165232X03000831>
- Guy, Z.M. & Birkeland, K.W. (2013). Relating complex terrain to potential avalanche trigger locations. *Cold Regions Science and Technology* 86: 1–13.
- Harrison, M., Gibson, A., Forster, A., Entwisle, D. & Wildman, G. (2008). GIS-based assessment. Retrieved 18 November 2015, from [http://www.transportscotland.gov.uk/sites/default/files/documents/rrd\\_reports/uploaded\\_reports/j10107/j10107-08.pdf](http://www.transportscotland.gov.uk/sites/default/files/documents/rrd_reports/uploaded_reports/j10107/j10107-08.pdf)
- Harvey, S. (2002). Avalanche incidents in Switzerland in relation to the predicted danger degree. *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2002, Penticton, British Columbia* 1–6.
- Harvey, S., Rhyner, H. & Schweizer, J. (2012). *Lawinenkunde. Praxiswissen für Einsteiger und Profis zu Gefahren, Risiken und Strategien*. München: Bruckmann Verlag GmbH.
- Harvey, S., Schweizer, J., Rhyner, H., Nigg, P. & Hasler, B. (2012). Achtung Lawinen. Merkblatt. Kern-Ausbildungsteam 'Lawinenprävention Schneesport' KAT. Retrieved 11 January 2016, from [http://www.slf.ch/dienstleistungen/merkblaetter/SLF\\_dt.9.12\\_low.pdf](http://www.slf.ch/dienstleistungen/merkblaetter/SLF_dt.9.12_low.pdf)
- Hengl, T. & Evans, I.S. (2009). Mathematical and digital models of the land surface. *Developments in Soil Science* 33: 31–63.
- Jellema, A., Stobbelaar, D.J., Groot, J.C.J. & Rossing, W. a H. (2009). Landscape character assessment using region growing techniques in geographical information systems. *Journal of Environmental Management* 90: 161–174.
- Kaiser, C. (2012). Zusammenhänge in ordinal- & metrisch-skalierten Daten entdecken: Korrelation & partielle Korrelation. In *Geo 246: Statistik. Vorlesungsunterlagen, FS 2012*. Universität Zürich.
- Kienzle, S. (2004). The Effect of DEM Raster Resolution on First Order, Second Order and Compound Terrain Derivatives. *Transactions in GIS* 8(1): 83–111.
- Maggioni, M. (2004). *Avalanche release areas and their influence on uncertainty in avalanche hazard mapping*. Department of Geography, University of Zurich.
- Maggioni, M. & Gruber, U. (2003). The influence of topographic parameters on avalanche release dimension and frequency. *Cold Regions Science and Technology*.
- Maggioni, M., Gruber, U. & Stoffel, A. (2002). Definition and characterisation of potential avalanche release areas. *ESRI International User Conference July 9-13, 2001*.
- Mallet, C. & Bretar, F. (2009). Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64(1): 1–16.
- McClung, D.M. (2001). Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging. *Annals of Glaciology* 32: 223–229.

- Nairz, P., Sauermoser, S., Kleemayer, K., Gabl, K., Stoffel, M. & Margreth, S. (2011). Lawinen: Entstehung und Wirkung. In F. Rudolf-Miklau & S. Sauermoser (eds.), *Handbuch Technischer Lawinenschutz*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG.
- Nelson, A., Reuter, H.I. & Gessler, P. (2009). DEM Production Methods and Sources. In *Geomorphometry — Concepts, Software, Applications* (Vol. 33).
- Palmer, S.E. (1992). Common region: A new principle of perceptual grouping. *Cognitive Psychology* 24: 436–447.
- Philipps Universität Marburg. (2011). Geomorphometrie oder wie Informationen aus Ableitungen entstehen. Retrieved 11 December 2015, from [http://gisbsc.gis-ma.org/GISBScL7/de/html/VL7a\\_V\\_lo1.html](http://gisbsc.gis-ma.org/GISBScL7/de/html/VL7a_V_lo1.html)
- Pike, R.J. (2005). Encyclopedia of Social Measurement. *Encyclopedia of Social Measurement* 669–675.
- Pike, R.J., Evans, I.S. & Hengl, T. (2009). Geomorphometry: A brief guide. *Geomorphometry — Concepts, Software, Applications* 33(1944): 3–30.
- Preetha, M.M.S.J., Suresh, L. & Bosco, M.J. (2012). Image segmentation using seeded region growing. *International Conference on Computing, Electronics and Electrical Technologies (ICCEET)*.
- R-Project. (o.J.). The R Foundation. Retrieved 23 December 2015, from <https://www.r-project.org/foundation/>
- Romstad, B. & Etzelmüller, B. (2012). Mean-curvature watersheds: A simple method for segmentation of a digital elevation model into terrain units. *Geomorphology* 139-140: 293–302.
- Schiewe, J. (2002). Segmentation of High-Resolution Remotely Sensed Data - Concepts , Applications and Problems. *Symposium on Geospatial theory, Processing and Applications XXXIV*: 6.
- Schmid, M. (2014). *Geomorphometrische Klassifikation von Murkegeln in den Alpentälern Mattertal und Goms*. Geographisches Institut, Universität Zürich.
- Schweizer, J., Jamieson, B. & Schneebeli, M. (2003). Snow avalanche formation. *Reviews of Geophysics* 41(4): 1–25.
- Schweizer, J. & Jamieson, J.B. (2000). Field observations of skier-triggered avalanches. Big Sky, Montana: Proceedings International Snow Science Workshop.
- Schweizer, J. & Jamieson, J.B. (2001). Snow cover properties for skier triggering of avalanches. *Cold Regions Science and Technology* 33(2-3): 207–221.
- Schweizer, J. & Lutschg, M. (2001). Characteristics of human-triggered avalanches. *Cold Regions Science and Technology* 33: 147–162.
- Shih, F.Y. & Cheng, S. (2005). Automatic seeded region growing for color image segmentation. *Image and Vision Computing* 23(10): 877–886.
- SLF. (o.J.-a). Snowpack. Retrieved 30 March 2015, from [http://www.slf.ch/ueber/organisation/schnee\\_permafrost/projekte/snowpack/index\\_DE](http://www.slf.ch/ueber/organisation/schnee_permafrost/projekte/snowpack/index_DE)
- SLF. (o.J.-b). Alpine3D. Retrieved 30 March 2015, from [http://www.slf.ch/ueber/organisation/schnee\\_permafrost/projekte/Alpine/index\\_DE](http://www.slf.ch/ueber/organisation/schnee_permafrost/projekte/Alpine/index_DE)
- SLF. (o.J.-c). Hangneigung. Retrieved 4 January 2016, from [http://www.slf.ch/praevention/ueberlawinen/lawinenbildung/gelaende/Hangneigung/index\\_DE](http://www.slf.ch/praevention/ueberlawinen/lawinenbildung/gelaende/Hangneigung/index_DE)

- SLF. (2016). Lawinenbulletin vom 10.01.2016. Retrieved 10 January 2016, from [http://www.slf.ch/lawinenbulletin/index\\_DE](http://www.slf.ch/lawinenbulletin/index_DE)
- Stahel, W. (2013). Residuen-Analyse. Retrieved 22 January 2016, from <http://stat.ethz.ch/~stahel/courses/regression/reg-resanal.pdf>
- Steinkogler, W., Sovilla, B. & Lehning, M. (2014). Influence of snow cover properties on avalanche dynamics. *Cold Regions Science and Technology* 97: 121–131.
- Straumann, R. (2010). *Extraction and Characterisation of Landforms from Digital Elevation Models: Fiat Parsing the Elevation Field*. Department of Geography, University of Zurich.
- Swisstopo. (o.J.). DOM. Retrieved 29 December 2015, from [http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dom\\_dtm-av.html](http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dom_dtm-av.html)
- Swisstopo. (2005). DOM. Das hochpräzise und informationsreiche Oberflächenmodell.
- Swisstopo. (2010). Swissimage. Das digitale Farbornthophotomosaik der Schweiz.
- Swisstopo. (2014). swissALTI3D. Das hoch aufgelöste Terrainmodell der Schweiz.
- Swisstopo. (2015). Swiss Map Raster. Produktdokumentation.
- Tate, N.J. & Fisher, F. (2006). Causes and consequences of error in digital elevation models. *Progress in Physical Geography* 30(4): 467–489.
- Temme, A.J.A., Heuvelink, G.B., Schoorl, J.M. & Claessens, L. (2008). Geostatistical Simulation and Error Propagation in Geomorphometry. In *Developments in Soil Science*. Elsevier.
- Turnbull, B. & McElwaine, J.N. (2007). A Comparison of Powder Snow Avalanches at Vallée de la Sionne with Plume Theories. *Journal of Glaciology* 53(180): 11.
- van Asselen, S. & Seijmonsbergen, A.C. (2006). Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. *Geomorphology* 78(3-4): 309–320.
- Vontobel, I. (2011). Geländeanalysen von Unfalllawinen.
- WhiteRisk. (o.J.-a). Lawinenbulletin = mehr als nur Gefahrenstufe. Retrieved 11 January 2016, from <https://www.whiterisk.ch/de/explore#u=02-01-02-01>
- WhiteRisk. (o.J.-b). Was ist eine Schneebrettlawine? Retrieved 10 January 2016, from <https://www.whiterisk.ch/de/explore#u=03-01-01>
- WhiteRisk. (o.J.-c). Entstehung von Schneebrettlawinen. Retrieved 10 January 2016, from <https://www.whiterisk.ch/de/explore#u=03-01-02>
- WhiteRisk. (o.J.-d). Einfluss der Hangneigung. Retrieved 10 January 2016, from <https://www.whiterisk.ch/de/explore#u=06-07-01-06>
- WhiteRisk. (o.J.-e). Exposition. Retrieved 10 January 2016, from <https://www.whiterisk.ch/de/explore#u=06-08>
- Wilson, J.P. (2012). Digital terrain modeling. *Geomorphology* 137(1): 107–121.
- Wilson, J.P. & Gallant, J.C. (2000). Digital Terrain Analysis. *Terrain Analysis: principles and applications* (1988): 1–21.

## CD-Inhalt

Auf der beigelegten CD ist sowohl die verfasste Arbeit als auch der verwendete Python-Code zu finden. Folgende Tabelle erklärt die vorhandenen Dateien etwas genauer.

<b>Ordner</b>	<b>Dateiname</b>	<b>Erklärung</b>
Masterarbeit	Masterarbeit_RPfister.pdf	Arbeit im pdf-Format
	Masterarbeit_RPfister.rtf	Arbeit im rtf-Format
Python-Code	rauigkeit.py	Umwandlung ASCII zu Array, Berechnung der Rauigkeitswerte aus einem DOM, Rückumwandlung zu ASCII
	region_growing.py	Umwandlung ASCII zu Array, Erstellung der Seedlist/des Seedsets, Region Growing zur Extraktion von Hängen rund um Anrisszonen, Rückumwandlung zu ASCII

## **Persönliche Erklärung:**

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

Regula Pfister

Winterthur, 28.01.2016