

Geomorphometrische Klassifikation von Murkegeln in den Alpentälern Mattertal und Goms

Masterarbeit GEO 511

Martin Schmid

08-709-347

Betreuer

Prof. Dr. Ross Purves

Abteilung Geocomputation

PD Dr. Christian Huggel

Abteilung Geomorphologie / Glaziologie

Fakultätsvertretung

Prof. Dr. Ross Purves

Geographisches Institut der Universität Zürich

30. September 2014

Dank

An dieser Stelle möchte ich mich bei den Personen bedanken, die mich während des Arbeitsprozesses unterstützt und motiviert haben. Besonderer Dank gebührt Prof. Dr. Ross Purves und Dr. Christian Huggel für Ihre tatkräftige Unterstützung durch Gespräche, Ratschläge, konstruktive Kritik und gelegentlichen Zuspruch.

Herzlich bedanken möchte ich mich auch bei

- meinen Mitstudenten und Mitstudentinnen für den regen Gedankenaustausch und die nötige Ablenkung in Form von Kaffeepausen.
- Freunden und Freundinnen, die auf «nach der Masterarbeit» getröstet werden mussten.
- meiner Familie für die moralische Unterstützung und ihre Geduld.
- Matthias Herrmann für die Hilfe in der linearen Algebra.
- meiner Schwester Esther Schmid und meinem Vater Johann-Jakob Schmid für die Durchsicht dieser Arbeit.
- Franziska Herrmann, die mir stets den Rücken gestärkt, Verständnis entgegengebracht und Beistand geleistet hat.

Zusammenfassung

Murkegel sind Ablagerungsformen gewaltiger Massenverlagerungsprozesse. Durch ihre oftmals dichte Besiedelung bilden sie eine Kontaktzone zwischen Menschen und diesen Massenverlagerungsprozessen, vorwiegend Murgängen. Letztere treten immer wieder über die Ufer und richten grosse Schäden an. Aufgrund der Form, Grösse und Neigung eines Kegels lassen sich Rückschlüsse auf Art und Häufigkeit von Murgängen ziehen, weshalb die Kartierung und Beschreibung solcher Kegel Sinn macht. Hauptziel der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung einer Methodik zur automatischen Extraktion und Klassifikation von Murkegeln in alpinen Gebieten gemässigter Breiten. Weiter sollte untersucht werden, welchen Einfluss die Auflösung der Datengrundlage auf die Klassifikation hat und sowohl Möglichkeiten als auch Schwierigkeiten eines automatischen Verfahrens aufgezeigt werden. Als Datengrundlage dienten das hoch aufgelöste, LiDAR-gestützte digitale Höhenmodell swissALTI3D und das schlechter aufgelöste DHM25. Die Murkegelextraktion in den Untersuchungsgebieten Val Müstair, Mattertal und Goms wurde mittels *region-growing* Algorithmus durchgeführt. Durchschnittlich wurde eine Sensitivität von 52% erzielt, während der positive prädikative Wert bei 82% lag, wobei unter Verwendung des swissALTI3D insgesamt bessere Ergebnisse erzielt wurden.

Die Resultate zeigen, dass verschiedene Limiten die Genauigkeit der Murkegelklassifikation beeinflussen. So spielt besonders die Morphologie des Untersuchungsgebiet eine entscheidende Rolle, was die Allgemeingültigkeit des Algorithmus einschränkt. Weiter wurde ersichtlich, dass hoch aufgelöste Datensätze in der Abgrenzung der Murkegel sehr nützlich sind aber trotzdem geglättet werden müssen, um eine zuverlässige Klassifikation zu erlauben.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation und Forschungskontext	1
1.2	Forschungsstand	2
1.3	Zielsetzung und Fragestellung	3
2	Theoretischer Hintergrund	5
2.1	Murkegel: Definition, Entstehung und Morphologie	5
2.2	Geomorphometrie	10
2.3	Digitale Höhenmodelle	12
2.3.1	Strukturierung	13
2.3.2	Oberflächenbezug	14
2.3.3	Datenerfassungsmethoden	15
2.3.4	Auflösung	16
2.3.5	Unsicherheiten und Fehler	17
2.3.6	swissALTI3D	18
2.3.7	DHM25	19
2.4	Land-surface parameter	20
3	Untersuchungsgebiet	22
3.1	Val Müstair	23
3.2	Mattertal	24
3.3	Goms	26
4	Methoden	29
4.1	Software	29

4.2	Konzeptueller Ansatz: Klassifikation der Murkegel mittels <i>Region-growing</i> Algorithmus	31
4.3	Wahl der <i>land-surface parameter</i> für den <i>region-growing</i> Algorithmus . . .	32
4.4	DHM-Verarbeitung	35
4.5	Digitalisieren der Trainingskegel	36
4.5.1	Verwendete Datensätze	37
4.5.2	Kartierungsmethodik	38
4.5.3	Unsicherheiten in der Kartierung	39
4.6	Berechnung der <i>land-surface parameter</i>	39
4.6.1	Modellierung der Oberfläche	41
4.6.2	Neigung	47
4.6.3	Plankurvatur	54
4.6.4	Abflussakkumulation	57
4.6.5	Rauigkeitsindex	62
4.7	Implementierung des <i>Region-growing</i> Algorithmus	64
4.7.1	Generierung der Seedpixel	64
4.7.2	<i>Region-growing</i>	64
4.8	Filterung	68
4.8.1	Neigungsfilterung	68
4.8.2	Grössenfilterung	69
4.9	Klassifikationsevaluation	71
4.10	Statistikberechnungen	72
5	Ergebnisse	73
5.1	Klassifikation des Mattertals mittels swissALTI3D	73
5.1.1	Grenzwerte und Güte der Abflussmodellierung	73
5.1.2	Nachfilterung mittels Rauigkeitsindex	77
5.1.3	Klassifikationsergebnisse unter Verwendung des swissALLTI3D-DHM	79
5.2	Klassifikation des Mattertals mittels DHM25	80
5.2.1	Grenzwerte und Güte der Abflussmodellierung	80
5.2.2	Nachfilterung mittels Rauigkeitsindex	84
5.2.3	Klassifikationsergebnisse unter Verwendung des DHM25	84

5.3	Klassifikation des Goms mittels swissALTI3D	85
5.3.1	Grenzwerte und Güte der Abflussakkumulation	85
5.3.2	Nachfilterung mittels Rauigkeitsindex	87
5.3.3	Klassifikationsergebnisse unter Verwendung des swissALLTI3D-DHM	90
5.4	Klassifikation des Goms mittels DHM25	91
5.4.1	Grenzwerte und Güte der Abflussakkumulation	91
5.4.2	Klassifikationsergebnisse unter Verwendung des DHM25	93
5.5	Neigungs- und Flächenwerte	95
6	Diskussion	99
6.1	Extraktion der Murkegel mittels hoch aufgelöstem DHM im alpinen Raum	99
6.1.1	Methodische und Prozess-bedingte Limiten der Klassifikation	100
6.1.2	Vergleich zum Ansatz von Miliaris und Argialas	109
6.2	Vor- und Nachteile der Verwendung eines hoch-aufgelösten DHM zur Klas-	
	sierung von Murkegeln	111
6.2.1	Vorteile	111
6.2.2	Nachteile	113
6.3	Möglichkeiten und Schwierigkeiten in einem automatischen Klassifikations-	
	prozess	116
7	Schlussfolgerung	119
7.1	Erreichtes	119
7.2	Erkenntnisse	120
7.3	Ausblick	121
	Literatur	124

Abbildungsverzeichnis

2.1	Anrisszone, Transit- und Ablagerungsbereich eines Murgangsystems	6
2.2	Typische Murgangablagerungen auf dem Murkegel von Tschier	8
2.3	Schematische Darstellung der Teildisziplinen der Geomorphometrie	11
2.4	Prozessierungsschritte eines DHM	13
2.5	Strukturierungsmethoden eines DHM	14
2.6	Einfluss der Zellenbreite	17
2.7	Erstellungsprozess des swissALTI3D	19
2.8	Erstellungsprozess des DHM25	20
3.1	Lage der Untersuchungsgebiete in der Schweiz	22
3.2	Val Müstair	24
3.3	Mattertal	26
3.4	Goms	28
4.1	Methodikübersicht	30
4.2	<i>land-surface parameter</i> für einen Murkegel im Val Müstair	34
4.3	Für die Kartierung der Murkegel verwendete Datensätze	40
4.4	Lokales Koordinatensystem	43
4.5	DHM vs. modellierte Oberfläche	46
4.6	Schematische Darstellung einer DHM-Abtastung mittels gleitendem Fenster	49
4.7	Neigungsunterschiede durch Verwendung verschiedener Nachbarschafts- grössen	51
4.8	Neigungsverteilungen der Test-Murkegel des Val Müstair.	53
4.9	Einfluss der Nachbarschaftsgrösse auf die Krümmungswerte	56
4.10	Erstellung eines Flussnetzwerks	60
4.11	Verfahren zur Berechnung des Rauigkeitsindex	63

4.12	Ablauf des <i>Region-growing</i>	65
4.13	Einfluss der Neigungsfilterung	70
5.1	Vergleich der Abflussmodellierungen in verschiedenen Regionen	76
5.2	Unterschiede der Gletscher und Murkegel des Mattertals in ihrer Oberflächenrauigkeit	78
5.3	Klassifikation des Mattertals mittels swissALTI3D	81
5.4	Abweichung der Abflussakkumulation zur Referenz im Gletscherbereich und im Tal	83
5.5	Klassifikation des Mattertals unter Verwendung des DHM25	86
5.6	Übereinstimmung/Abweichung der Abflüsse am Oberaargletscher im Tal	88
5.7	Verteilungen der Rauigkeitswerte von Gletschern und Murkegeln	89
5.8	Klassifikation des Goms auf Basis des swissALTI3D	92
5.9	Klassifikation des Goms auf Basis des DHM25	94
5.10	Abweichungen der Neigung und Fläche pro Kegel je Untersuchungsgebiet	97
5.11	Verteilung der Neigungs- und Flächenwerte der Murkegel im Mattertal und Goms	98
6.1	Unterscheidung eines Sturzkegels von einem Murkegel	101
6.2	Seitlich verlaufendes Gerinne auf einem Murkegel	104
6.3	Artefakte des swissALTI3D auf dem Murkegel von Täsch	115

Tabellenverzeichnis

4.1	Merkmale der Murkegel und ihre Operationalisierung zu <i>land-surface parameter</i>	33
5.1	Zur Klassifikation der Murkegel im Mattertal verwendete Werte	74
5.2	Distanzwerte des Abflussnetzwerks	75
5.3	Durchschnittliche Rauigkeitswerte der klassierten Gebiete im Mattertal . .	79
5.4	Konfusionsmatrix der Klassifikationsresultate der Murkegel des Mattertals	80
5.5	Zur Klassifikation des Mattertals mittels DHM25 verwendete Werte.	82
5.6	Konfusionsmatrix der Klassierung des Mattertals mittels DHM25	85
5.7	Zur Klassifikation des Goms verwendete Werte.	87
5.8	Konfusionsmatrix der Klassierung für das Goms, nach der Gletscherfilterung	90
5.9	Zur Klassifikation des Goms mittels DHM25 verwendete Werte	91
5.10	Konfusionsmatrix für die Klassifikation des Goms mittels DHM25	95
5.11	Flächen- und Neigungswerte der Murkegel für die Täler Mattertal und Goms	96

1 Einleitung

1.1 Motivation und Forschungskontext

Murgänge repräsentieren eine der zerstörerischen aller Naturgewalten im alpinen Raum und stellen aus geomorphologischer Sicht äusserst effiziente Massenverlagerungsprozesse dar (DE SCALLY, F. A. ET AL., 2010; GAMMA, 2000; WHIPPLE, 1994). Wo sie nicht auf besiedelte Gebiete treffen, verlaufen Murgangereignisse oft unbemerkt. Treffen sie aber einzelne Häuser, Siedlungen oder Verkehrseinrichtungen, können sie erheblichen Schaden an Infrastruktur und Mensch anrichten. Meist erfolgen solche Begegnungen auf den natürlichen Ablagerungsräumen von Murgängen, den Murkegeln. In den letzten Jahren hat die Besiedelung und Nutzung der Murkegel stark zugenommen (STALEY ET AL., 2006), was dazu führt, dass mögliche Begegnungen zwischen Murgängen und dem Mensch immer häufiger werden. Kommt hinzu, dass bereits grosse Murgangereignisse durch partielle Erosion von Murkegeln ein Vielfaches ihres Ursprungsvolumen aufnehmen können und so immense Schäden anrichten können, wie dies im Jahr 2005 in der Nähe von Guttannen in der Schweiz geschehen ist (BERGER ET AL., 2011). Es ist deshalb wichtig, Ablagerungsprozesse und -formen der Murgänge zu verstehen. Ein wichtiger Schritt dazu ist die Kartierung und geomorphometrische Beschreibung der Murkegel. Solche Kartierungen und Beschreibungen basieren oft auf Expertenwissen von Geomorphologen (SMITH, 2011). Um den Kartierungs- und Beschreibungsvorgang aber objektiver und effizienter zu gestalten, sind automatische Klassifikationsverfahren von Nöten (ARGIALAS & TZOTSOS, 2006).

1.2 Forschungsstand

MACMILLAN & SHARY (2009) heben die Wichtigkeit von *landforms* und deren Klassifikation hervor, da aus der Grösse und Form Erkenntnisse über die beteiligten Prozesse gewonnen werden können. Dementsprechend wurden bereits viele Oberflächenformen anhand von digitalen Höhenmodellen (DHM) beschrieben und klassifiziert. Darunter befinden sich allgemeine, grundlegende Elemente wie Pässe, Senken, Grate, Gipfel, Ebenen oder Kanäle (BOLONGARO-CREVENNA ET AL., 2005; WOOD, 1996) und spezifische Landformen, wie beispielsweise Dünen, Sandstrände (LUCIEER & STEIN, 2005) oder Abflusssysteme (TARBOTON, 1997; PASSALACQUA ET AL., 2010). Ablagerungskegel, die durch fluviale Prozesse gebildet wurden, waren ebenfalls oft Untersuchungsgegenstand, jedoch war das Ziel der verschiedenen Arbeiten meistens nicht die Extraktion von und Klassifikation aus einem DHM. Es finden sich einige Studien, die den Unterschied zwischen Murkegeln und Schwemmkegeln untersucht haben (DE SCALLY, F. A. ET AL., 2010; VOLKER ET AL., 2007). Andere haben Ablagerungen auf den Kegeln beschrieben (CAVALLI & MARCHI, 2008; FRANKEL & DOLAN, 2007; KOSTACHUCK ET AL., 1986; KYOJI S. & TAKASHI O., 2005; MAY & GRESSWELL, 2004; WHIPPLE & DUNNE, 1992; WHIPPLE, 1994). Unterschiede zwischen Schwemm- und Murkegeln wurden meistens über die Neigung (DE SCALLY, F. A. ET AL., 2010; KYOJI S. & TAKASHI O., 2005) oder die Oberflächenrauigkeit (CAVALLI & MARCHI, 2008; VOLKER ET AL., 2007) definiert, deren Untersuchung mit dem Aufkommen von hoch-auflösenden LiDAR-gestützten DHM immer häufiger geworden ist. Weitere Studien im Bezug auf Murkegel betreffen vor allem die Gefahrenabschätzung durch Verlaufsmodellierung von Murgängen (GAMMA, 2000; GRAF ET AL., 2011; HUGGEL ET AL., 2003). Weiter wurde das Verhältnis von Kegelgrösse und Einzugsgebietgrösse in verschiedenen klimatischen Regionen untersucht (KOSTACHUCK ET AL., 1986; MAY & GRESSWELL, 2004). Vor dem Aufkommen von DHM wurden Murkegel manuell kartiert (WHIPPLE, 1994; MELELLI & TARAMELLI, 2004). Eine der ersten Studien, welche sich eine automatische Klassifikation von Schwemmkegeln und die Ableitung geomorphologischer Prozesse zum Ziel gesetzt hat, ist diejenige von FARR & CHADWICK (1996). Die Autoren verwendeten Radarbilder und Satellitenaufnahmen im sichtbaren Wellenlängenbereich, um Schwemmkegel in den ariden Hügelzügen des Kun Lun Gebirge in China zu kartieren. Dabei dienten Salzablagerungen zur spektralen Unterscheidung der Schwemmkegel von ihrer Umgebung. Ein *maximum-likelihood*-Klassifikator wurde verwendet, um einzelne

Bildpixel dem Kegel zuzuweisen. MILIARESIS & ARGIALAS (2000) und später ARGIALAS & TZOTSOS (2006) führten im Death Valley, USA eine Klassifikation durch, welche auf ein grob aufgelöstes DHM (90 Meter Zellenbreite) und Landsat- respektive Aster-Satellitenbilder zur Erkennung von Schwemmkegeln basierte. Die Kegel wurden mittels *Region-growing* extrahiert. Da die Erkennung der untersten Kegelzonen nur durch hellere Salzablagerungen in der Ebene möglich war, erlaubten die Satellitenbilder eine verbesserte Klassifikation der Kegel. Leider wurden für sämtliche Schwemmkegelklassifikationen nur sehr kleine Untersuchungsgebiete verwendet, wobei dieses Defizit weiter verschärft wurde, indem Teile der schon kleinen Gebiete als Trainingsgebiete verwendet wurden. Schade ist auch, dass sich sämtliche Studien nur auf Gebiete beziehen, welche durch ausgesprochen aride Bedingungen geprägt sind. Auch ist nicht bekannt, wie gut Kegelformen mittels hoch aufgelöster DHM extrahiert werden können und welche Verbesserungen oder eventuell auch Defizite durch die höhere Auflösung hervorgerufen werden. Diese verschiedenen Faktoren bilden die Forschungslücke im Bereich der Murkegelklassifikation.

1.3 Zielsetzung und Fragestellung

Für die vorliegende Arbeit ergeben sich durch die Forschungslücke folgende Ziele:

- Entwicklung einer Methode zur automatischen Klassifikation und Extraktion von Murkegeln im alpinen Raum. Dazu soll ein hoch-aufgelöstes DHM verwendet werden.
- Anwendung der Klassifikationsmethode auf ein grob aufgelöstes DHM. Damit soll ein Vergleich der beiden Resultate ermöglicht und dadurch eventuelle Skaleneinflüsse untersucht werden können.
- Erörtern der Möglichkeiten und Komplikationen eines automatischen Klassifikationsverfahrens.

Um diese Ziele zu erreichen wurden drei Forschungsfragen formuliert, auf welche am Schluss der Arbeit einzeln eingegangen wird.

1. *Forschungsfrage: Inwieweit und wie genau lassen sich Murkegel mittels automatischer Klassifikation aus dem hoch aufgelösten digitalen Höhenmodell swissALTI3D extrahieren?*

2. *Forschungsfrage: Was sind Vorteile der Verwendung eines hoch-aufgelösten DHM in der Klassifikation von Murkegeln und wo liegen die Nachteile?*

3. *Forschungsfrage: Wo liegen die Möglichkeiten und die Schwierigkeiten bei einem automatischen Verfahren zur Extraktion von Murkegeln?*

2 Theoretischer Hintergrund

Im folgenden Kapitel werden theoretische Konzepte und Grundlagen erläutert, welche in der Entwicklung der Klassifikationsmethode für Murkegel Verwendung fanden. Deren Prinzipien sind zum besseren Verständnis der einzelnen Methodenschritte hilfreich und werden in Sinne eines Überblicks präsentiert. Auf die genauere Umsetzung der Konzepte und deren Einbindung in die Klassifikation wird dann im Kapitel 4 genauer eingegangen.

2.1 Murkegel: Definition, Entstehung und Morphologie

Stark vereinfacht gesagt, sind Murkegel Ablagerungszonen von Murgängen. Gemäss HÄBERLI (1991) sind Murgänge äusserst wirkungsvolle Massenverlagerungsprozesse, die aus einem Gemisch aus Lockermaterial und Wasser bestehen. Der Murgang durchläuft von der Anrisszone meist einen schluchtartigen, stark geneigten Geländeabschnitt, bevor er in flacheres Gebiet gelangt, wo die Fliessgeschwindigkeit abnimmt und sich das Lockermaterial ablagert (GAMMA, 2000). Abbildung 2.1 stellt einen solchen Verlauf am Beispiel des Illgrabens im Kanton Wallis dar. Durch häufige Wiederholung des Vorgangs bildet sich mit der Zeit eine Kegelform. Murkegel oder generell Ablagerungskegel werden aber nicht ausschliesslich durch Murgangablagerungen gebildet und geformt. Oftmals tragen auch fluviale Ablagerungen zur Oberflächenbildung bei (CAVALLI & MARCHI, 2008; DE SCALLY, F. A. ET AL., 2010). WHIPPLE (1994) definiert Murkegel demnach auch als Schwemmkegel, auf welchen hauptsächlich die Murgangablagerungen dominieren. Im deutschen Sprachgebrauch ist demzufolge manchmal auch von Murschwemmkegeln die Rede (LOUIS, 1968). Zur Bildung von Murkegeln können aber auch Lawinen (BENZ, 1998; LOUIS, 1968) oder, wie es im Falle der riesigen Kegel im Val Venosta, Italien vermutet wird, auch Bergstürze beitragen (JARMAN ET AL., 2011). Angesichts der verschiedenen Prozesse, die auf die Morphologie eines Murkegels Einfluss haben können wird klar, dass es sich bei einem Murkegel also nicht einfach um eine Ablagerungszone von Murgängen, sondern vielmehr um

eine Ablagerungszone verschiedener Fliess- und Sturzprozesse handelt. Man könnte auch sagen, dass ein Murkegel ein Kontinuum von Ablagerungsformen darstellt (LOUIS, 1968; KYOJI S. & TAKASHI O., 2005). Deshalb scheint die relativ allgemeine Definition für Murkegel von WHIPPLE (1994), die auch durch GAMMA (2000) ähnlich formuliert wird, am ehesten zuzutreffen und wird demzufolge in dieser Arbeit verwendet.

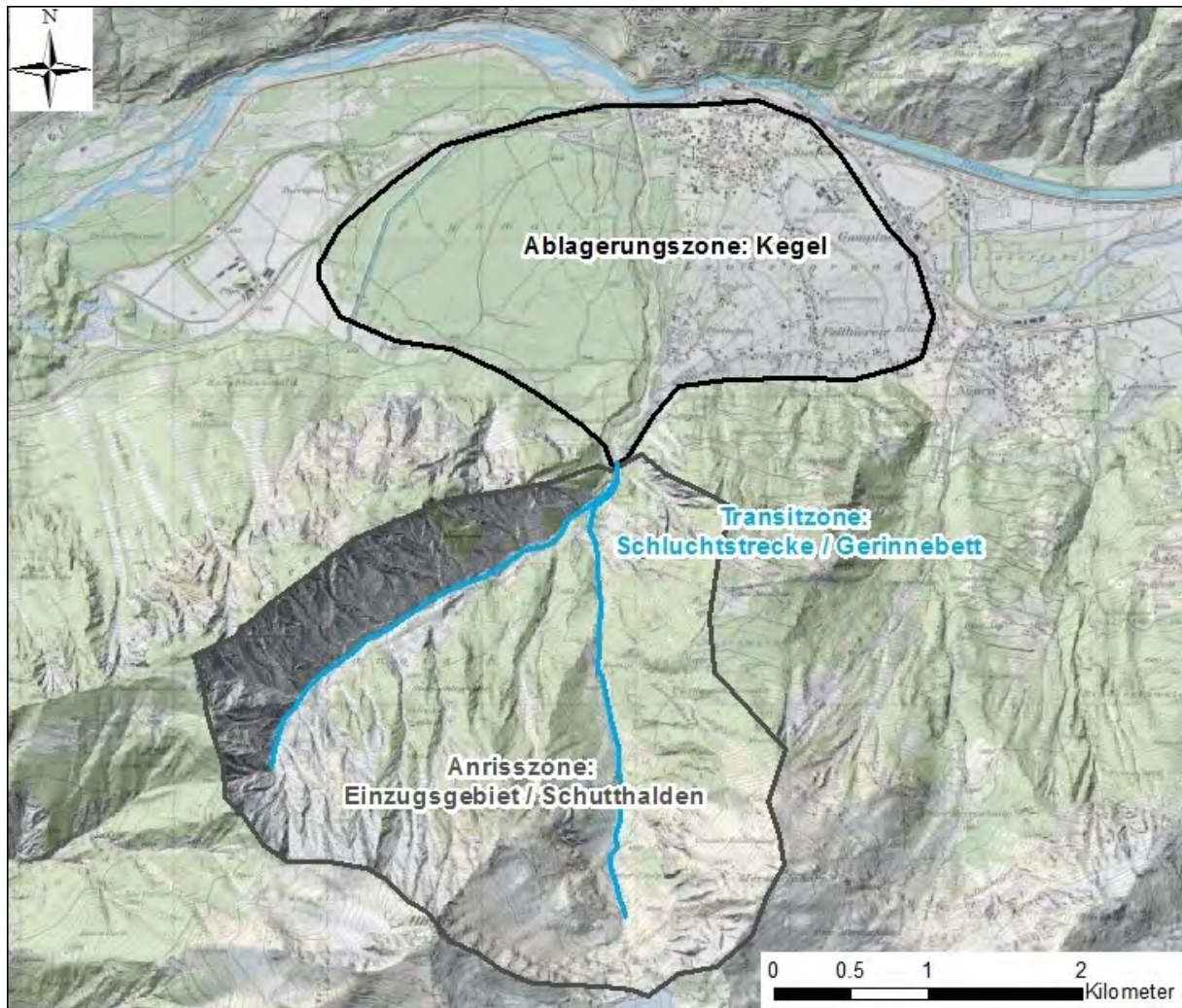


Abbildung 2.1: Anrisszone, Transit- und Ablagerungsbereich am Beispiel des Illgrabens im Kanton Wallis. Verwendete Daten: swissALTI3D und digitale Pixelkarte 1:25000 von swisstopo.

Es besteht allerdings Einigkeit darin, dass sich Murkegel von „puren“ Schwemmkegeln in einigen Merkmalen unterscheiden. So weisen Murkegel eine grössere Neigung auf, sind

meist kleiner und haben eine sehr raue, reliefierte Oberfläche (GAMMA, 2000; VOLKER ET AL., 2007; DE SCALLY, F. A. ET AL., 2010). Diese Rauigkeit entsteht primär durch für Murgänge typische Ablagerungen. GAMMA (2000) beschreibt die Rauigkeit sehr genau. Der folgende Abschnitt ist seiner Arbeit entnommen. Bei Abnahme des Gefälles verliert der Murgang an Energie, wodurch er einen Teil des mitgeführten Geschiebes an den Seiten in Form von Wällen, sogenannten Levées, ablagert. Abbildung 2.2 zeigt solche Levées auf dem Murkegel von Tschieriv im Val Müstair. Diese Ablagerungen können innerhalb als auch ausserhalb des Gerinnes geschehen, falls der Murgang durch Verstopfung des Gerinnes durch einen alten Murgang zum Verlassen des Gerinnes gezwungen wird oder es sich um ein sehr grosses Ereignis handelt. Nimmt die Neigung zu stark ab, so bleibt der Murgang abrupt stehen, wodurch die Murfront, welche aus grossem, grobblockigem Geschiebe besteht, als sogenannter Murkopf abgelagert wird. Durch die Ablagerungen entsteht eine lokale Erhöhung. Mit der Zeit sucht sich das Gerinne ein neues Bett. Dies kann sich mehrere Male wiederholen und ehemalige Gerinneverläufe sind dann auf dem Kegel gut erkennbar. Ist das Gerinne nicht eingetieft, kann man davon ausgehen, dass sich der Kegel noch im Aufbau befindet. Ein eingetieftes Gerinne hingegen deutet auf eine unterbrochene oder abgeschlossene Kegelbildung hin, was aber nicht bedeuten muss, dass die Murgangaktivität selbst auch unterbrochen ist. Eine weitere Eigenschaft von (aktiven) Murkegeln ist, dass die Vegetation innerhalb des Gerinnes als auch an den Flanken teilweise oder vollständig durch Murgänge zerstört worden ist BENZ (1998). Das Gerinne selber ist meist relativ tief, da Murgänge vor allem die Gerinnesohle und weniger die Böschungen erodieren. Bei grossen Murgangereignissen kann das Bachbett sehr stark erodiert werden, wodurch der Murgang beträchtlich an Volumen zunimmt (COROMINAS ET AL., 1996). Das Breite-Tiefeverhältnis der Gerinne liegt normalerweise unter 5:1 (GAMMA, 2000). Die Form und Grösse der Murkegel wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Laut WHIPPLE (1994) wird die Fläche des Kegels vor allem durch die Fläche des Einzugsgebiets, das lokale Klima, die Lithologie und das Relief gesteuert. Alle diese Faktoren beeinflussen das Erosionsvolumen und somit auch das Sedimentvolumen, welches auf dem Kegel abgelagert werden kann. MAY & GRESSWELL (2004) erkennen zwar den Einfluss der Grösse des Einzugsgebiets im Bezug auf die Kegelfläche, heben aber hervor, dass die Talbreite und der somit verfügbare Platz für den Kegel entscheidender sind. Ist das Haupttal, in welches der Kegel „mündet“ sehr eng, wird der Murkegel durch den Hauptfluss erodiert, wodurch er, selbst bei häufigen Murgang-Ereignissen in seinem



Abbildung 2.2: Typische Murgangablagerungen auf dem Murkegel von Tschier im Val Müstair. Die gestrichelten Linien an der Bildseite zeigen sogenannte Le-vées. Eigenes Foto.

Grössenwachstum limitiert ist.

WHIPPLE & DUNNE (1992) beschreiben in ihrer Arbeit, dass die Neigung eines Murkegels primär von dem Fliessverhalten des Murgangs abhängig ist. Dieses wird wiederum von der Grösse des Einzugsgebiets und der Lithologie gesteuert. Je nach Grösse des Einzugsgebiets sind der maximale Abfluss und das Verhältnis Sediment/Wasser unterschiedlich und somit auch das Fliessverhalten eines Murgangs. Ein kleines Einzugsgebiet stellt kleinere Abflussmengen zur Verfügung als ein grösseres Einzugsgebiet, was zu einem höheren Sediment/Wasser-Verhältnis führt. Murgänge mit hohem Sediment/Wasser-Verhältnis (WHIPPLE, 1994) zeigen eine hohe Viskosität, lagern das Material häufig auf der Gerinneseite ab und führen zu grösseren Murkegelneigungen als solche mit kleinem Sediment/Wasser-Verhältnis. Bei unterschiedlicher Lithologie variiert die Partikelgrösse der Sedimente innerhalb eines Murgangs. WHIPPLE (1994) konnte beobachten, dass Murkegel, die durch granitische Gesteinsablagerungen gebildet worden waren, eine grössere Neigung aufwiesen, als solche die durch gemischte (granitische Gesteine und Metasedimente) aufgeschichtet worden waren. Für Murgänge, deren Lockermaterial vorwiegend aus kleinen Partikeln besteht, kann man eine erhöhte Viskosität beobachten, welche durch die Kohäsion der Partikel entsteht (WHIPPLE & DUNNE, 1992). Eine erhöhte Viskosität kann aber auch durch starke innere Reibung zwischen grösseren Blöcken entstehen (GAMMA, 2000). Murgänge mit hoher Viskosität neigen dazu, abrupter zu stoppen, wenn die Schubspannung sinkt (WHIPPLE & DUNNE, 1992; GAMMA, 2000). Daraus folgt eine frühere Ablagerung, beispielsweise am Kegelhals, was mit der Zeit zu einem steileren Kegel führt (WHIPPLE, 1994). Flachere Kegel hingegen, scheinen durch weniger viskose Murgänge geformt worden zu sein (STALEY ET AL., 2006).

Die Neigung der Murkegel kann relativ stark variieren, es scheint keine typische, charakteristische Neigung für sie zu geben. DE SCALLY, F. A. ET AL. (2010) untersuchten 32 Murkegel in den neuseeländischen Alpen. Die durchschnittliche Neigung aller Kegel betrug 6.7°. Für sechs Murkegel im Mattertal wurden Neigungen von 13 bis 20° gemessen GRAF ET AL. (2011). Bei den Untersuchungen von STALEY ET AL. (2006) wurden im Death Valley durchschnittliche Kegelneigungen zwischen 7 und 24° gemessen. COROMINAS ET AL. (1996) haben tabellarisch mehrere Quellen zusammengetragen. Die Spannweite der Neigung reicht in dieser Tabelle von 1° bis 25°. Das Längen-

profil eines Murkegels kann gerade bis konvex sein (GAMMA, 2000). Die Konvexität im Querprofil entspricht der eines Kegels, was sich im Namen des Murkegels widerspiegelt.

Zusammenfassend sollen die wichtigsten Punkte nochmals festgehalten werden:

- Murkegel werden durch eine Vielzahl von Ablagerungsprozessen gebildet, wobei die Murgangablagerungen im aktuellen Entwicklungsstadium eine dominante Rolle einnehmen.
- Sie unterscheiden sich von reinen Schwemmkegeln (Kegel die nur durch Überschwemmungen gebildet wurden) in der Fläche und Neigung, insbesondere aber durch ihre raue Oberfläche. Auf Murkegeln findet man typische Ablagerungsformen wie Levées und Murköpfe vor.
- Der Gerinneverlauf auf einem Murkegel verändert sich kontinuierlich.
- Die Fläche wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst, wobei die Grösse des Einzugsgebiets als auch die durch die Talbreite limitierte Auslauffläche eine entscheidende Rolle spielen.
- Die Neigung eines Murkegels hängt primär von der Rheologie des Murgangs ab.
- Im Längensprofil ist ein Murkegel gerade bis konvex, im Querprofil weist er eine ausgesprochen konvexe Form auf.

2.2 Geomorphometrie

Geomorphometrie ist die Wissenschaft, welche sich mit der quantitativen Beschreibung und Analyse der Erdoberfläche beschäftigt (PIKE ET AL., 2009). Von der Geomorphologie, welche gemäss LOUIS (1968, S. 1) «... Lehre von den Formen der festen Erdoberfläche » ist, unterscheidet sich die Geomorphometrie also insbesondere durch den quantitativen Aspekt (PIKE, 2000). Als interdisziplinäre Wissenschaft besteht sie aus Teilbereichen der Erdwissenschaften, Mathematik und Informatik und dient einer Vielzahl von Disziplinen zu spezifischen Untersuchungen PIKE ET AL. (2009). (Abb. 2.3) zeigt, die zur Geomorphometrie beitragenden Disziplinen, deren Hauptaufgaben und die

Gebiete auf, in denen sie Anwendung findet.

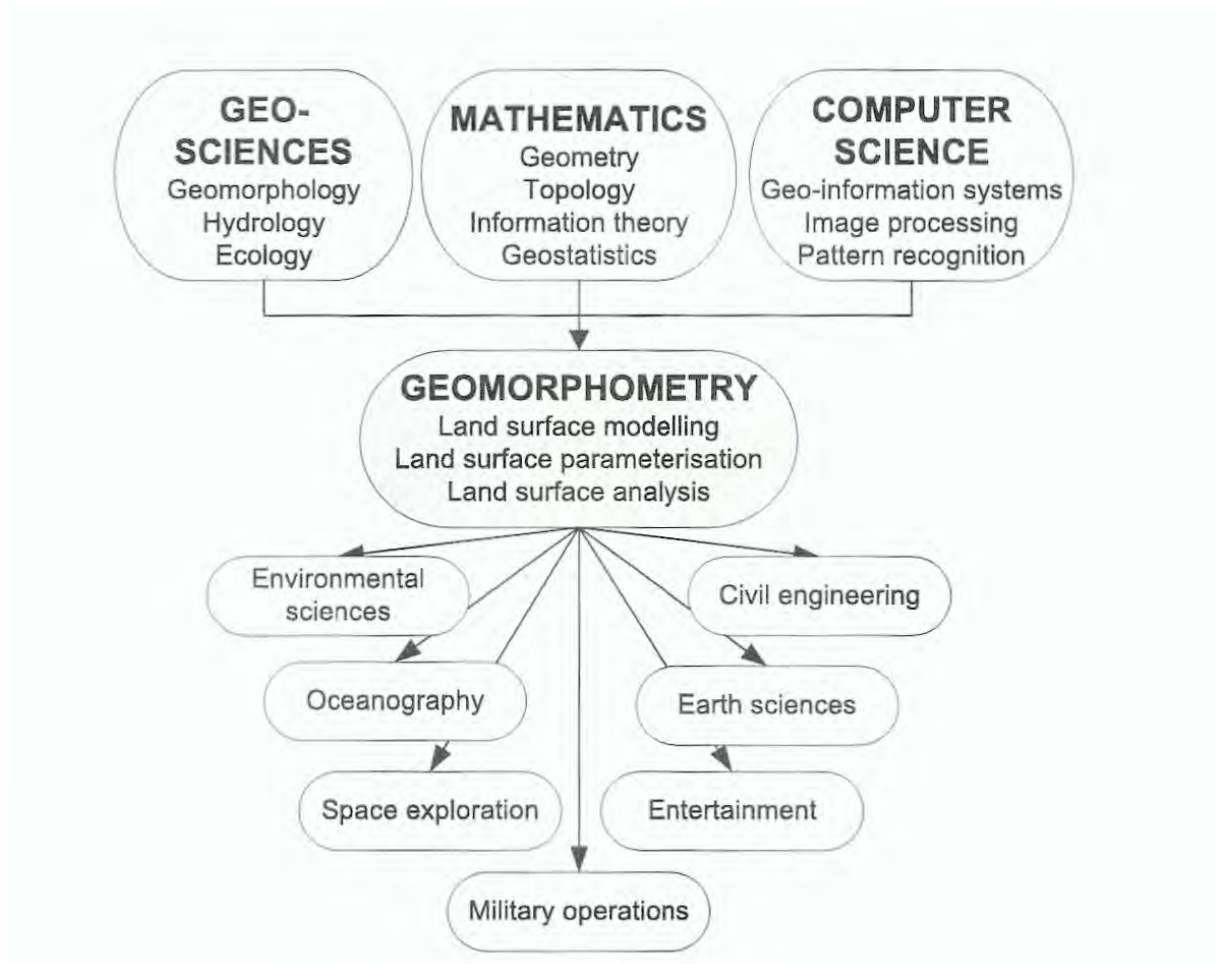


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Teildisziplinen der Geomorphometrie, ihrer Hauptaufgaben und der Endnutzerdisziplinen gemäss PIKE ET AL. (2009).

Einerseits kann mit der allgemeinen Geomorphometrie die *land surface form*, die kontinuierliche Oberfläche beispielsweise des Festlands untersucht werden, mit der spezifischen Geomorphometrie aber auch die *landform*, also ein abgegrenzter, klar definierter Teil der Landoberfläche beschrieben werden (EVANS, 2012). Die Datengrundlage der Geomorphometrie wird heutzutage meist durch ein digitales Höhenmodell (DHM) gebildet (PIKE ET AL., 2009). Ein DHM ist eine kontinuierliche Repräsentation der Oberfläche, das heisst, dass sich daraus Höhen an jedem beliebigen Punkt der repräsentierten Oberfläche ableiten

lassen können (HENGL & EVANS, 2009). Die genauere Beschreibung der in dieser Arbeit verwendeten DHM folgt in den Abschnitten 2.3.6 und 2.3.7. Aus einem DHM lassen sich *land-surface parameter* ableiten, welche eine Messgrösse zur Beschreibung der Oberflächenform darstellen (WILSON, 2012). Beispiele dafür sind die Neigung oder Exposition (PIKE ET AL., 2009). Mit Hilfe dieser *land-surface parameter* lassen sich dann *land-surface objects*, also ganz bestimmte, abgegrenzte Objekte der Oberfläche beschreiben und extrahieren (PIKE ET AL., 2009) oder ganz allgemein beschreiben. Ein Beispiel für *land-surface objects* sind Murkegel. PIKE ET AL. (2009) gliedern den grundlegenden Arbeitsprozess, der Geomorphometrie in fünf Schritte. Diese sind in der (Abb. 2.4) dargestellt. Für diese Arbeit sind nur die letzten beiden Schritte relevant, da die als Datengrundlage verwendeten DHM schon für die Analyse aufbereitet worden waren. Zu den im vierten Schritt verwendeten *land-surface parameter*, gehören unter anderem die Neigung und die Krümmung. Zu den *land-surface objects* gehört das Flussnetzwerk, welches aber ebenfalls durch einen *land-surface parameter* berechnet wurde, nämlich die Flussakkumulation. Auf die genaue Beschreibung und Umsetzung wird im Kapitel 4 genauer eingegangen. Der letzte Schritt der DHM - Prozessierung besteht in dieser Arbeit in der Klassifikation und Kartierung der Murkegel.

2.3 Digitale Höhenmodelle

Digitale Höhenmodelle können auf verschiedene Arten strukturiert sein, d.h. die Erdoberfläche repräsentieren (unregelmässig vs. regelmässig), sich auf verschiedene Oberflächen beziehen, mit unterschiedlichen Datenerfassungsmethoden erstellt worden sein und verschiedene Auflösungen in der horizontalen als auch der vertikalen Ebene aufweisen. Jeder dieser Unterschiede hat wiederum einen Einfluss auf die zur Untersuchung der DHM angewandten Methoden und auf das Untersuchungsergebnis. Da es sich bei digitalen Höhenmodellen um Repräsentationen und nicht exakte Abbildungen der Oberfläche handelt, gehen immer auch gewisse Unsicherheiten und Fehler mit der Erstellung und der Prozessierung von DHMs einher. Die folgenden Abschnitte beschreiben die vorhin genannten Unterschiede, Unsicherheiten und schliesslich wird auch etwas genauer auf die in dieser Arbeit verwendeten DHM eingegangen.

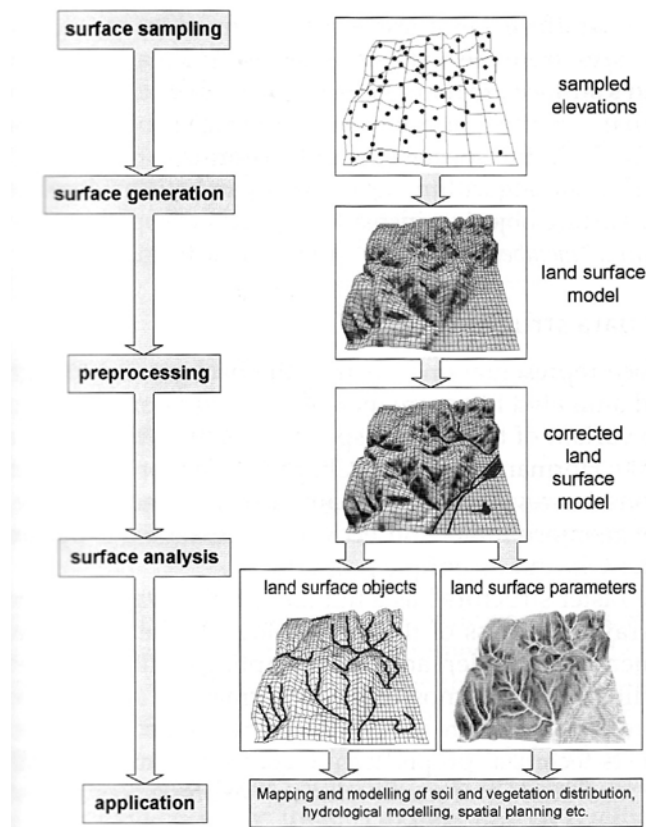


Abbildung 2.4: Prozessierungsschritte eines digitalen Höhenmodells (DHM). Aus (PIKE ET AL., 2009)

2.3.1 Strukturierung

Grundlage für die Erzeugung von Höhenmodellen bildet die Annahme, dass die Höhe z an jedem Punkt mit den Koordinaten (x,y) nur von letzteren abhängt ((HENGL & EVANS, 2009):

$$z = f(x, y) \quad (2.1)$$

Ein digitales Höhenmodell wird erzeugt, indem man durch mehrere Punkte, in denen x,y und z bekannt sind, eine Oberfläche legt, die möglichst genau der reellen Erdoberfläche entsprechen soll. Da die Höhen zwischen den bekannten Punkten aber nicht gegeben sind, müssen diese mittels Interpolation ermittelt bzw. erzeugt werden (SCHMIDT ET AL., 2003). Die Anordnung der bekannten Punkte und damit die Strukturierung des DHM kann dabei grundsätzlich auf drei Arten erfolgen (PIKE, 2005). Die erste Möglichkeit

besteht darin, die Punkte mittels Triangulation zu verbinden, wobei der von Delaunay beschriebene Algorithmus verwendet wird ((HENGL & EVANS, 2009). Diese Struktur wird Triangular Irregular Network (TIN) genannt. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, die Punkte in einer Gitterstruktur anzuordnen, wobei die Gitterzellen üblicherweise eine quadratische Form aufweisen, was aber nicht der Fall sein muss ((HENGL & EVANS, 2009). Jede Zelle erhält dabei implizit (d.h. relativ zu einem vordefinierten Nullpunkt) x - und y -Koordinaten und der Zellenwert entspricht der Höhe z (PIKE, 2005). Heutzutage werden in der Geomorphometrie vor allem Gitter (Raster) als DHM-Strukturen verwendet (WILSON, 2012), da diese Struktur sich besser eignet, um *land-surface parameters* abzuleiten, die Struktur sehr einfach nachzubilden ist und direkt mit in Computern sehr geläufigen Bildbearbeitungsalgorithmen kompatibel ist (HENGL & EVANS, 2009). Die dritte, jedoch im Vergleich zu den zuvor beschriebenen Strukturen weniger oft verwendete Möglichkeit ist es, das DHM nach Konturen, also Höhenlinien zu strukturieren (KIENZLE, 2004). (Abbildung 2.5) stellt die drei Strukturierungsmethoden im Vergleich dar.

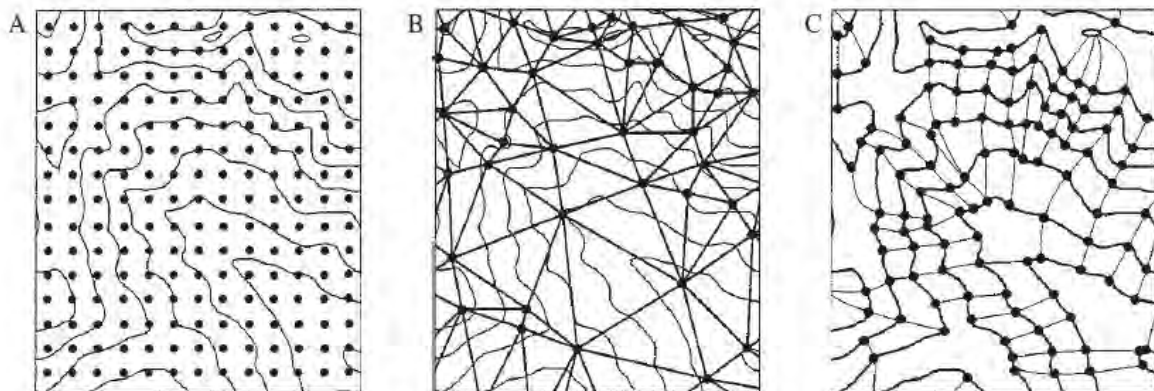


Abbildung 2.5: Vergleich der drei Strukturierungsmethoden für DHM. A: Gitter / Rasterstruktur, B: TIN C: Strukturierung nach Höhen- und Neigungslinien (PIKE, 2005).

2.3.2 Oberflächenbezug

DHM bildet genau wie das englische Pendant DEM (für digital elevation model) einen Überbegriff (PIKE ET AL., 2009), insbesondere seit dem Aufkommen von auf LiDAR¹-

¹LiDAR = Light Detection And Ranging

Daten basierenden DHM (siehe 2.3.3). Je nach Frequenz des durch ein LiDAR-System emittierten Laserpulses und der damit einhergehenden Penetrationstiefe dieses Pulses können nämlich zwei oder mehrere Oberflächen abgetastet und modelliert werden (PIKE ET AL., 2009). Es sind dies üblicherweise diejenige, die durch die erste Pulsrückmeldungen *first echo* und die, welche durch die letzten Pulsrückmeldungen *last echo* interpoliert werden können. Erstere bilden dann ein Digitales Oberflächenmodell (DOM). Dieses bildet die Erdoberfläche mitsamt der Vegetation (Bäume, Sträucher) und beispielsweise Bauwerken (Häuser) ab. Dagegen bildet die durch die *last echos* interpolierte Oberfläche ein digitales Gelände- oder Terrainmodell (DGM / DTM). Dieses bildet die Erdoberfläche ohne Vegetation oder Bauwerke ab und wird üblicherweise für geomorphometrische Untersuchungen verwendet. Im geomorphometrischen Sinne bezieht sich der Begriff DHM also eher auf ein DGM / DTM.

2.3.3 Datenerfassungsmethoden

Für die Generierung eines DHM werden drei Datenerfassungsmethoden verwendet. Die erste Möglichkeit ist die Vermessung von Punkten im Feld NELSON ET AL. (2009). Die zweite Möglichkeit besteht in der visuellen oder computergesteuerten Interpolation von Höhenlinien und anderer Anhaltspunkte auf topographischen Karten (PIKE, 2005). Fernerkundungsmethoden liefern die Daten für die dritte Datenerfassungsmethode.

Vermessungen im Feld mit Hilfe von hochwertigen Apparaturen wie Theodoliten, terrestrischen Lasern und differentiellem GPS liefern die Datengrundlage für äusserst genaue DHM, werden aber aufgrund der mit den Messkampagnen verbundenen Komplexität und Kosten kaum für flächendeckende DHM verwendet. (NELSON ET AL., 2009)

Bei dem Prozess der Interpolation von Höhenlinien und speziellen Anhaltspunkten werden diese entweder manuell oder durch Einscannen der Karten und mit Hilfe von Digitalisierungs-Software halbautomatisch digitalisiert und anschliessend interpoliert (NELSON ET AL., 2009).

Photogrammetrie, LiDAR und Radar (Radio detection and ranging) bilden die Fernerkundungsmethoden zur Erfassung von Daten für die DHM-Generierung (NELSON ET AL., 2009). Durch Übereinanderlegen zweier Bilder, die aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommen wurden, lässt sich mittels Trigonometrie die Höhe der Oberfläche ableiten. Die

Zukunft der Datenerfassung für DHM liegt aber in der Verwendung von interferometrischem Radar und insbesondere LiDAR NELSON ET AL. (2009). Beide Systeme funktionieren ähnlich. Ein Sensor, der sich auf einer fortbewegenden Plattform (meist ein Flugzeug oder Satellit) befindet, sendet mit einer bestimmten Frequenz Impulse und empfängt diese wenig später wieder. Die Laufzeit liefert Informationen über die Höhe der Oberfläche. Dabei muss aber sowohl die Flughöhe als auch die Geschwindigkeit, Orientierung des Flugzeugs und die Position bekannt sein. Dies geschieht mit Hilfe von GPS und Kreiselkompass. Beide Methoden, insbesondere aber LiDAR liefern die Grundlage für DHM mit hoher vertikaler und horizontaler Auflösung (NELSON ET AL., 2009).

2.3.4 Auflösung

Die horizontale und vertikale Auflösung eines DHM spielen eine entscheidende Rolle, wie genau die Topographie durch dieses repräsentiert wird (WILSON, 2012). Gemäss KIENZLE (2004) ist die Genauigkeit der ermittelten Höhen und die Verteilung der Punkte, die diese Höheninformation enthalten, entscheidend für eine realistische Geländeanalyse. Ein weiterer entscheidender Faktor den er erwähnt, ist die Wahl der Zellengrösse der Rasterzellen. Die Zellengrösse oder -weite (bei quadratischen Zellen) entspricht der horizontalen Auflösung eines DHM. Je feiner die Auflösung ist, desto feiner wird die Oberfläche abgetastet und modelliert (HENGL & EVANS, 2009). Abbildung 2.6 illustriert diesen Zusammenhang schematisch.

Daraus folgt, dass Derivate von DHM wie *land-surface parameter* direkt von der horizontalen Auflösung des DHM abhängig sind (SHARY ET AL., 2002; HENGL & EVANS, 2009; KIENZLE, 2004; WILSON, 2012). KIENZLE (2004) beispielsweise zeigt auf, dass die *land-surface parameter* Neigung und Krümmung bei zu grober Auflösung im Vergleich zur Realität unterschätzt werden und dass sich die modellierten und gemessenen Werte bei zunehmend feinerer Auflösung immer mehr angleichen (KIENZLE, 2004). Allerdings sind DHM mit feiner horizontaler und vertikaler Auflösung mit sehr hohen Kosten verbunden (NELSON ET AL., 2009) und nicht immer von Nöten. Die Wahl der Auflösung eines DHM sollte davon abhängen, wie komplex das Terrain ist und welche Grösse die zu beschreibenden *land-surface objects* aufweisen. So reicht es unter Umständen aus, für die Abbildung eines Murkegels ein DHM mit 25 Metern Zellengrösse zu wählen. Sollen aber die Murgangablagerungen auf den Murkegeln abgebildet werden, so muss eine feinere Auflösung

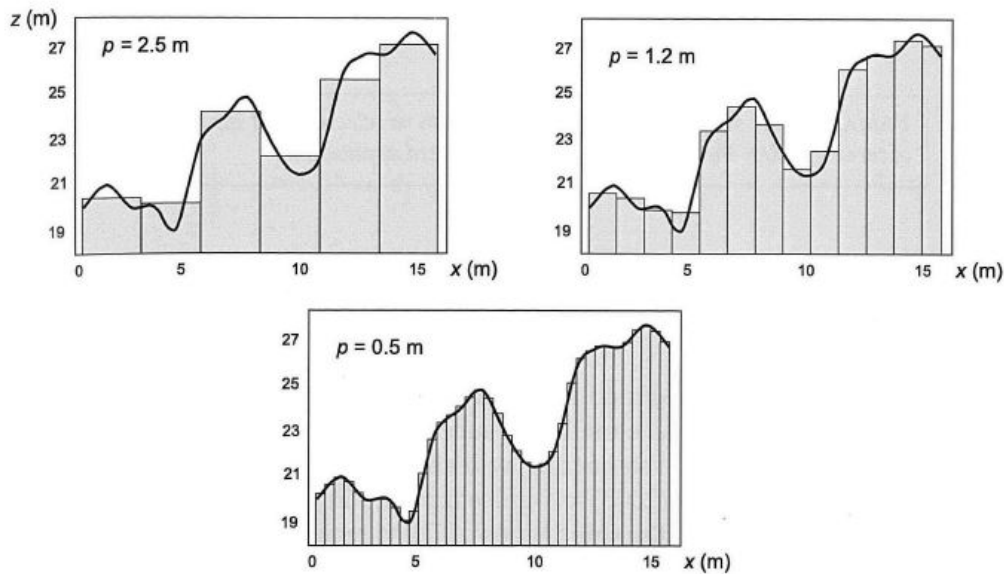


Abbildung 2.6: Einfluss der Zellenbreite p auf die Repräsentation der Topographie. Je kleiner die Zellenbreite, desto genauer folgt die Repräsentation der Topographie (Säulen) der wirklichen Topographie (Kurve). Zu grosse Zellenbreiten führen zu einer unrealistischen Repräsentation. Aus (HENGL & EVANS, 2009).

gewählt werden. Ein guter Ansatz bietet das Nyquist-Theorem, welches, übertragen auf den Fall der DHM Auflösung, besagt, dass die Auflösung mindestens doppelt so fein / hoch sein sollte, wie die Grösse des zu darstellenden Objekts HENGL & EVANS (2009). Verschiedene Methoden zur Wahl der passenden horizontalen Auflösung eines DHM werden in den Arbeiten von HENGL & EVANS (2009) und KIENZLE (2004) beschrieben.

2.3.5 Unsicherheiten und Fehler

Wie bei jeder Modellierung bestehen auch bei der Modellierung der Topographie Unsicherheiten. Unsicherheiten und Fehler entstehen durch Messfehler bei der Vermessung des Geländes, bei der Verarbeitung der Daten und nicht zuletzt auch bei der Interpolation (SCHMIDT ET AL., 2003; TEMME ET AL., 2009; WILSON, 2012). Da die Entscheidung für eine gewisse Interpolationsmethode auf ganz bestimmten Annahmen über das Gelände basiert und Abweichungen von der Realität bewusst in Kauf genommen werden, spricht

man in diesem Falle auch von Unsicherheiten (SCHMIDT ET AL., 2003). Nicht alle Fehler in einem DHM können verhindert werden. Daher ist es umso wichtiger, diese Fehler zu quantifizieren und somit eine Interpretation bezüglich Genauigkeit und Brauchbarkeit der durch die DHM-Analyse erzielten Resultate zu ermöglichen (WILSON, 2012). Oftmals wird dafür der *root mean square error* kurz RMSE verwendet (TEMME ET AL., 2009). Die Fehlerfortpflanzung zu modellieren ist der zweite Schritt, der eine Interpretation der Resultate ermöglichen soll. Hierzu wird oft eine Monte-Carlo Simulation durchgeführt, wobei eine Datenverarbeitungsoperation mehrere Male mit leicht veränderten Werten der Inputparameter durchgeführt wird und die Auswirkung auf die Resultate betrachtet wird (TEMME ET AL., 2009).

2.3.6 swissALTI3D

Das DHM swissALTI3D des Schweizerischen Bundesamtes für Landestopografie swisstopo bildete für diese Arbeit den wichtigsten Datensatz. Der folgende Abschnitt beschreibt das DHM in Berücksichtigung der Abschnitte 2.3.1 - 2.3.5 und ist der offiziellen Produktdokumentation entnommen. Das sehr hoch aufgelöste DHM swissALTI3D wurde unterhalb von 2000 m.ü.M. mit Hilfe von LiDAR erhoben. Oberhalb von 2000 m.ü.M. wurde es ursprünglich durch Daten des DHM25 (siehe 5.2.1) ergänzt, schliesslich aber kontinuierlich durch, mittels Stereokorrelation von Luftbildern gewonnene Daten ersetzt (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE, 2012b). Stereoskopische Messungen lieferten sowohl Punkte als auch Bruchkanten, welche kombiniert mit den mittels LiDAR gewonnenen Punkten zu TINs verarbeitet wurden. Anschliessend wurde durch Interpolation eine Rasterstruktur erzeugt. In Abbildung 2.7 ist dieser Prozess und eine Schummerung des Endresultats ersichtlich. Die horizontale Auflösung des swissALTI3D beträgt zwei Meter. Eine weitere wichtige Angabe für LiDAR-generierte DTM ist die *Punktdichte/m²*. Durchschnittlich liegt die Punktdichte für das gesamte DTM bei zwei *Punkten/m²*. Der Vorteil der Verwendung von LiDAR und Photogrammetrie zur Erzeugung des swissALTI3D zeigt sich in dessen Genauigkeit der Höhenangaben. Gemäss Hersteller beträgt der Höhenfehler maximal 50cm für Gebiete unter 2000 m.ü.M. und ein bis drei Meter über 2000 m.ü.M. (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE, 2014).

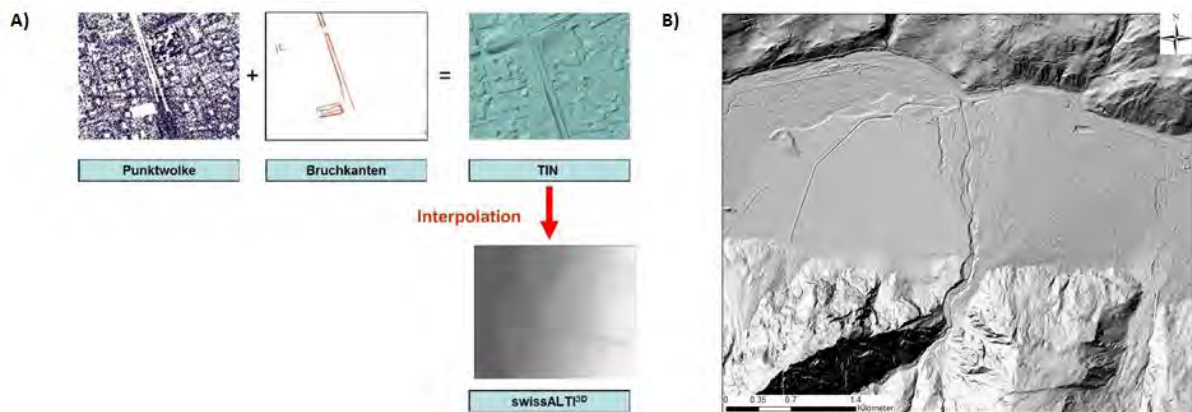


Abbildung 2.7: A) Erstellungsprozess des swissALTI3D-DHM. Entnommen aus (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE, 2014) B) Schummerung eines swissALTI3D DHM-Ausschnitts. Dargestellt wird der Illgraben im Wallis. Verwendeter Datensatz: Hillshade swissALTI3D von swisstopo.

2.3.7 DHM25

Das in dieser Arbeit als Vergleichsdatsatz verwendete DHM25 ist der Vorgänger des swissALTI3D und wurde ebenfalls vom Schweizerischen Bundesamtes für Landestopografie swisstopo hergestellt. Als Datengrundlagen wurden digitalisierte topographische Landeskarten im Massstab 1:25000 verwendet. Die Interpolation zu einem vollständigen DHM erfolgte mit Hilfe von digitalisierten Höhenlinien, Seekonturen und Höhenkoten. Zusätzlich wurden aus Luftbildern extrahierte Hauptbruchkanten verwendet, um die Genauigkeit in den Alpen zu gewährleisten. In Abbildung 2.8 wird der Herstellungsprozess des DHM 25 und die gleiche Szenerie wie in Abbildung 2.7 illustriert. Man beachte den Unterschied zwischen dem geschummerten swissALTI3D-Ausschnitt und demjenigen des DHM25. Dieser rührt daher, dass das DHM25, wie es der Name impliziert, eine horizontale Auflösung von 25m aufweist. Für die Höhe liegen die Abweichungen im Mittelland bei unter zwei Metern. Im Alpenraum hingegen steigt die Höhenabweichung auf acht Meter an, in gewissen Gebieten liegt sie sogar drüber (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE, 2005).

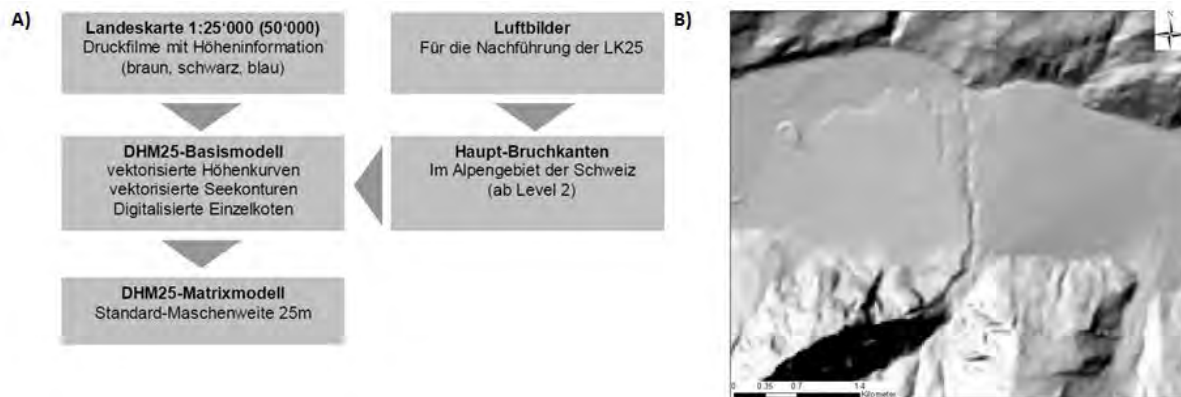


Abbildung 2.8: A) Erstellungsprozess des DHM25. Entnommen aus (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE, 2005) B) Schummerung eines DHM25-Ausschnitts. Dargestellt wird der Illgraben im Wallis. Verwendete Daten: Hillshade des DHM25 von swisstopo.

2.4 Land-surface parameter

Im Abschnitt 2.2 wurden sie kurz angedeutet: *land-surface parameter*, manchmal auch *morphometric variables* genannt (EVANS, 2012; MINÁR & EVANS, 2008) bilden meist den ersten Schritt zur Untersuchung eines DHM (OLAYA, 2009). Laut SEIJMONSBERGEN ET AL. (2011) kann man *basic local*-, *basic regional*-, hydrologische und für klimatische Modellierungen verwendete und statistische *land-surface parameter* unterscheiden. Hydrologische und klimatische *land-surface parameter* werden auch *secondary land-surface parameter* genannt (WILSON, 2012), da zusätzliche Information zur Hydrologie oder dem Klima (bsp. Sonnenscheindauer) von Nöten ist. Im Gegensatz dazu meint *Basic*, dass man den *land-surface parameter* direkt vom DHM ableiten kann und keine Zusatzinformation benötigt (OLAYA, 2009). Die Terme lokal und regional der *basic local/regional land-surface parameter* beziehen sich auf die Nachbarzellen, die benötigt werden um einen *land-surface parameter* zu berechnen (WILSON, 2012). Üblicherweise werden für den lokalen Fall die umliegenden 8 Nachbarzellen für die Berechnung des *land-surface parameter* der Zentralszelle verwendet (SEIJMONSBERGEN ET AL., 2011). Im regionalen Fall hingegen werden andere Regionen oder das ganze DEM zur Berechnung hinzugezogen WILSON (2012). Dies klingt momentan vielleicht etwas abstrakt, wird aber spätestens einleuchten, sobald die in der Arbeit verwendeten *land-surface parameter* im Kapitel 4 erklärt werden. Um *basic*

local land-surface parameter zu berechnen geht man immer nach den gleichen Schritten vor. Als ersten Schritt modelliert man mittels einer mathematischen Funktion (Ebengleichung) eine Oberfläche, die sich möglichst gut an das DHM und dessen Stützpunkte (=Zellenwerte) «schmiegt» (OLAYA, 2009). Es handelt sich dabei um eine lokale Oberfläche (daher der Name *local land-surface parameter*), die für jede Zelle mit Hilfe seiner Nachbarn neu berechnet wird. Es entsteht eine Art «gleitendes Fenster», in welchem die lokale Oberfläche gerechnet wird. Im zweiten Schritt kann für die Zentralzelle eine weitere mathematische Funktion berechnet werden wie beispielsweise der Durchschnitt oder die erste Ableitung (OLAYA, 2009). So entsteht ein neues Gitter, welches für jede Zelle statt der ursprünglichen Höheninformation nun das Resultat der mathematischen Funktion enthält.

3 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet für die vorliegende Arbeit setzt sich aus drei Alpentälern der Schweiz zusammen. Als Trainingsgebiet diente das Valmüstair, das Goms und das Mattertal dienten als Validierungsgebiete.

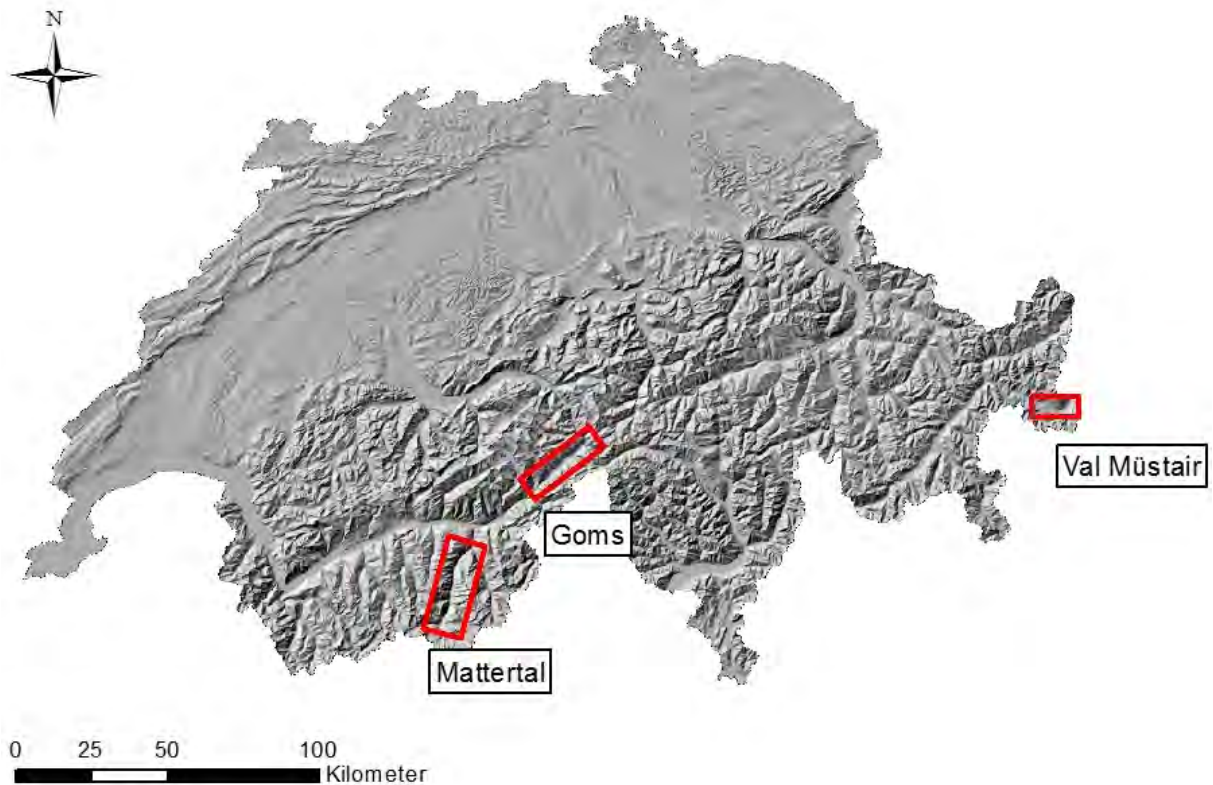


Abbildung 3.1: Lage der Untersuchungsgebiete in der Schweiz. Verwendete Daten: Hills-hade swissALTI3D von swisstopo.

3.1 Val Müstair

Das Val Müstair liegt im Kanton Graubünden und ist das südöstlichste Tal der Schweiz. Es reicht von der Ofenpasshöhe bis hin zur italienischen Grenze bei der Ortschaft Müstair und weist eine Länge von ungefähr 18 Kilometern auf (BENZ, 1998). Klimatisch wird das Val Müstair durch milde Temperaturen und Trockenheit charakterisiert, es gehört gar zu den trockensten Tälern der Alpen (GEMEINDE VAL MÜSTAIR, 2011). Es wird durch 13 Wildbäche und den Rom, den Hauptfluss des Tales zum Etsch hin entwässert (BENZ, 1998; GEMEINDE VAL MÜSTAIR, 2011). Geologisch wird das Tal den ostalpinen Decken zugewiesen, wobei die Schichtungen und Faltungen sehr komplex sind (BENZ, 1998). Die Sedimentpakete des Gebietes sind schiefrig und teilweise stark verwittert (GEMEINDE VAL MÜSTAIR, 2011). Durch die Verwitterung dieser Pakete entsteht viel Schutt, welcher immer wieder unter anderem in Form von Murgängen über die Wildbäche transportiert, am Talboden als Schutt- bzw. Murkegel abgelagert wird (GEMEINDE VAL MÜSTAIR, 2011). Der grösste Murkegel des Tals befindet sich bei Tschier. Ein weiterer, grosser Murkegel, der eine besonders schöne Form aufweist, ist derjenige bei Müstair. Insgesamt wurden bei der Begehung des Tals neun kegelförmige Ablagerungen gezählt (siehe Abbildung 3.2), von welchen die meisten eine Mischform von Mur- und Schwemmkegeln zu sein scheinen. Der flachste Kegel liegt bei Fuldera und weist heutzutage im unteren Kegelbereich keine Murgangablagerungen mehr auf.

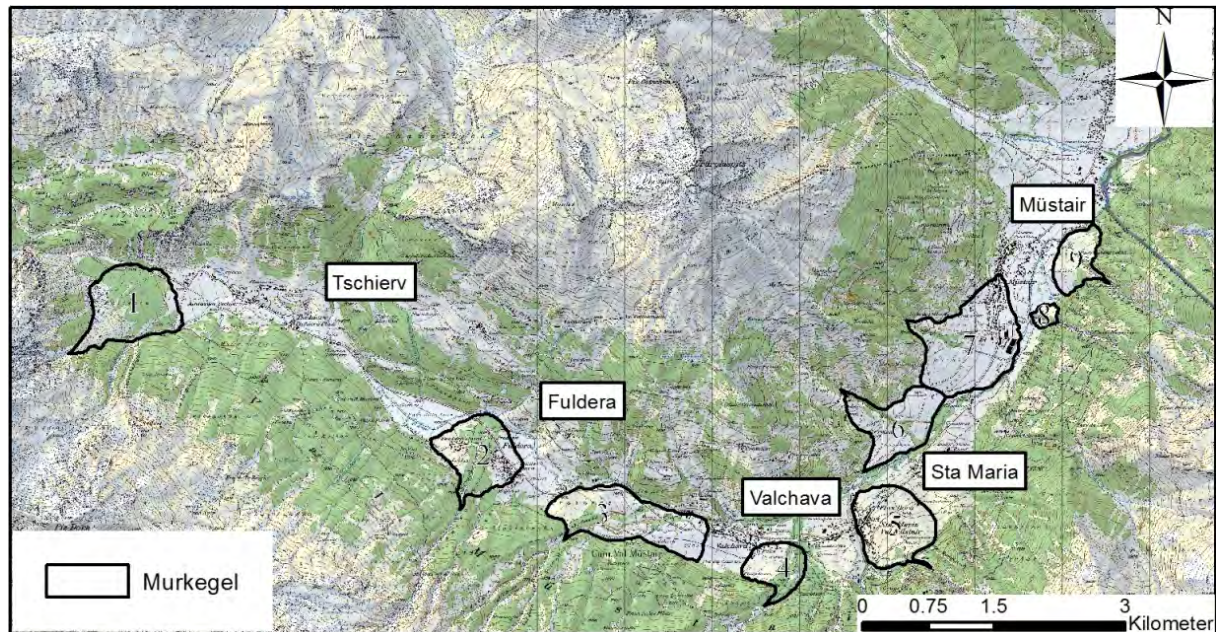


Abbildung 3.2: Untersuchungsgebiet Val Müstair. Murkegelnummerierung: 1 Kegel Tschierv, 2 Kegel Fuldera, 3 Kegel Prasüras, 4 Kegel Valchava, 5 Kegel Sta Maria, 6 Kegel Pizzet, 7 Kegel Müstair, 8 Kegel Müstair klein, 9 Kegel Legnai. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 von swisstopo.

3.2 Mattertal

Das Untersuchungsgebiet im Mattertal erfasst nicht das gesamte Mattertal, welches von Stalden bis Zermatt reicht, sondern nur ein Teilgebiet von Steg bis südlich von Täsch. Die Begrenzung auf ein Teilgebiet musste aufgrund rechnerischer Limiten vorgenommen werden. Das Mattertal weist auf dieser Strecke eine Länge von gut 15 Kilometern auf. Im Vergleich zum Val Müstair sind die Gebirgszüge rund um das Mattertal einiges höher, wobei die höchsten Gipfel auf über 4500 m.ü.M. liegen. Dadurch ist das Tal einiges steiler und enger als das Münstertal. Die Mattervispa, Hauptentwässerung des Tales, bildet zusammen mit der Saaser Vispa aus dem benachbarten Saastal durch den Zusammenfluss bei Stalden die Vispa. Ähnlich wie es für das Val Müstair der Fall war, ist das Klima des Mattertals mild und niederschlagsarm, insbesondere in den unteren Lagen (GRAF ET AL., 2011). Geologisch gesehen, ist das Mattertal Teil der Mischabeldecke und besonders brüchige und verwitterungsfähige Gesteine ebendieser Decke bilden den Schutt, welcher durch

ungewöhnlich hohe Vorstossgeschwindigkeiten der Blockgletscher direkt in die Gerinne der murfähigen Wildbäche abgelagert wird GRAF ET AL. (2011). Im Mattertal sind die Kegel steiler als im Val Müstair und ihre Oberflächen weisen deutlichere Murgangspuren auf. Einige dieser Kegel, so wird spekuliert, könnten teilweise aber auch durch Sturzprozesse entstanden sein (GRAF ET AL., 2011). Von den insgesamt 20 Murkegeln des Mattertals ist der Murkegel bei Mattwald, welcher durch den «grosse Grabe» mit Material gespeist wird, der grösste. Einer der flacheren Kegel ist derjenige von Täsch.

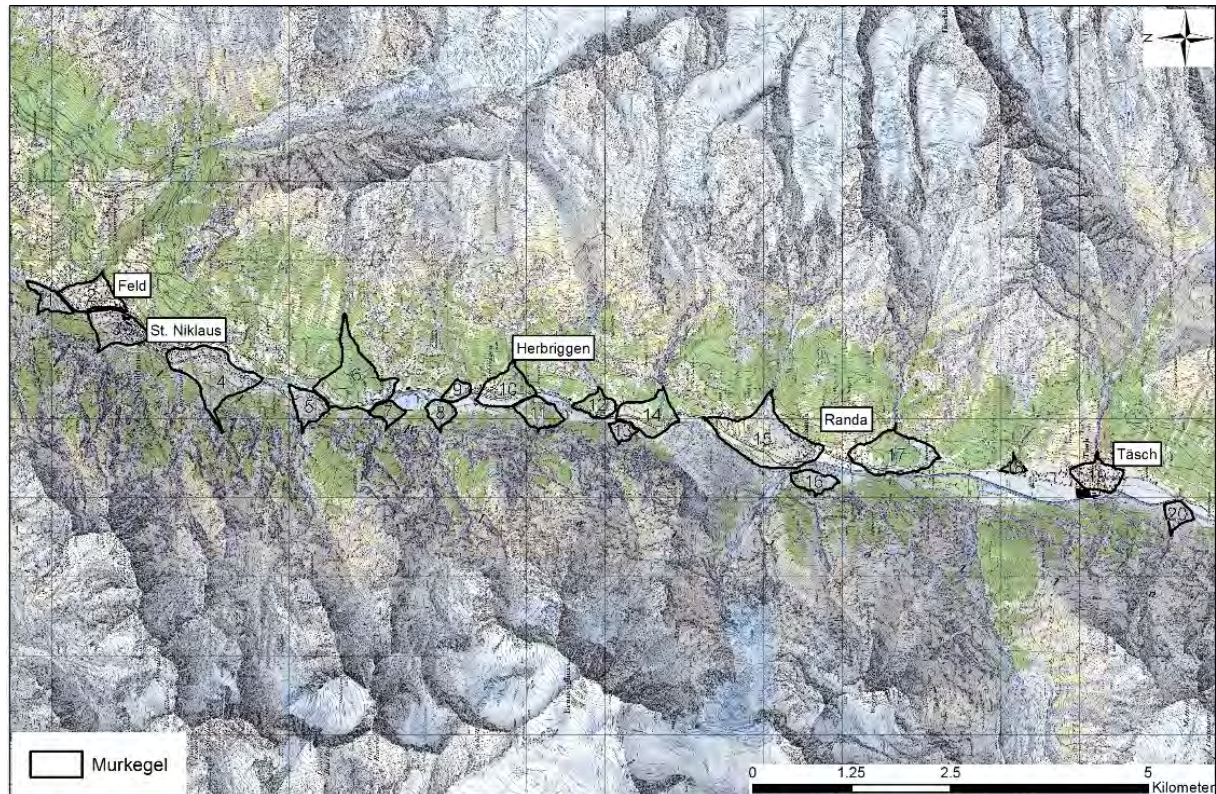


Abbildung 3.3: Untersuchungsgebiet Mattertal. Murkegelnummerierung: 1 Kegel Esch, 2 Kegel Feld, 3 Kegel St. Niklaus, 4 Kegel Birchmatten, 5 Kegel Blattbach, 6 Kegel Mattwald, 7 Kegel Mattmatte, 8 Kegel Tummigbach, 9 Kegel Beil, 10 Kegel Herbruggen, 11 Kegel Zen Achern, 12 Kegel Breitmatten, 13 Kegel Breittmatten 2, 14 Kegel Birchbach, 15 Kegel Randa, 16 Kegel Schusslauzug, 17 Kegel Wildi, 18 Kegel Ranft, 19 Kegel Taesch, 20 Kegel Mettelzug. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 von swisstopo.

3.3 Goms

Das Untersuchungsgebiet im Goms erstreckt sich von Oberwald im Osten bis nach Niederwald im Westen, bevor die Rotten (Rohne), Hauptfluss des Tals eine enge schluchtartige Strecke nach Fiesch durchquert. Auf dieser Strecke, welche sich über 16 Kilometer erstreckt, weist das Tal ein sehr niedriges Gefälle auf (BÖGLI, 1941). Auch das Goms weist ein eher mildes und trockenes Klima auf. Es ist breiter als die beiden bisher beschriebenen Täler, besitzt aber streckenweise steilere Bergflanken. Geologisch geprägt wird das

Tal von Aaregranit und Gneissen (BÖGLI, 1941). Auffällig sind die drei grossen Kegel des Goms. Es handelt sich dabei um den Kegel von Münster im Osten, denjenigen von Reckingen westlich davon und den Ritzinger Kegel (Ritzingerfeld) im Westen. Von diesen drei Kegeln ist derjenige bei Münster der grösste. BÖGLI (1941) vermutet, dass dieser Kegel durch Moränenmaterial entstand, welches durch den Rückzug des Rhonegletschers instabil wurde und durch heftige Regenfälle als «...riesige Mure in den weiten, offenen Talboden...» (BÖGLI, 1941, s.51) stürzte. Wie BÖGLI (1941) anmerkt, fehlt aber auf jedem dieser drei grossen Kegel jegliches Anzeichen von Einwirkung fliessendes Wassers. Einzig auf dem Ritzingerfeld fand Bögli im oberen Kegelbereich kleine Runsen, welche Spuren von Murgängen aufweisen. Über die Entstehung der Kegel von Ritzingen und Reckingen kann nur spekuliert werden. Alle drei Kegel weisen auf ihren jetzigen Oberflächen (bis auf die räumlich begrenzte Fläche auf der Kegelfläche des Ritzingerfelds) keine ausgeprägten Murgangspuren auf. Die kleineren Kegel des Tals weisen zum Teil aber klare Spuren vergangener Murgangaktivität auf. Insgesamt wurden 28 Kegel im Untersuchungsgebiet kartiert.

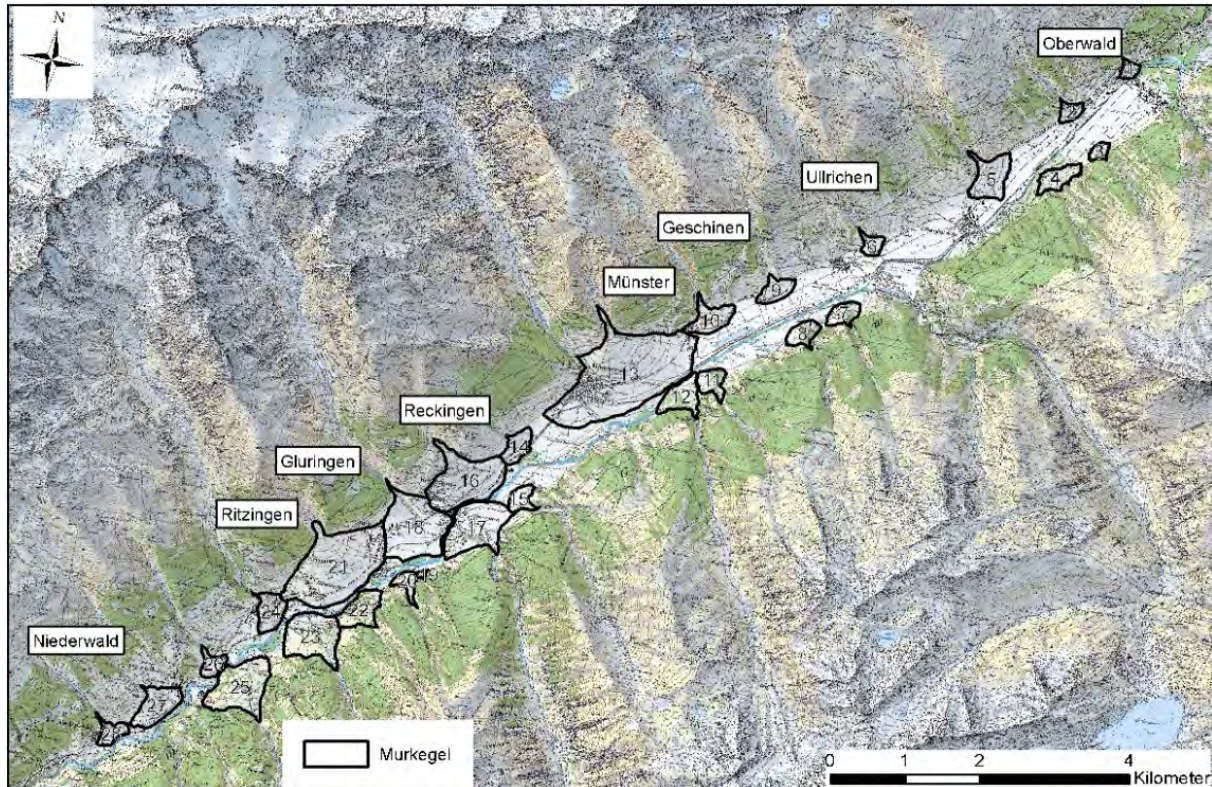


Abbildung 3.4: Untersuchungsgebiet Goms. Murkegelnummerierung: 1 Kegel Oberwald, 2 Kegel Riti b.O., 3 Kegel Löuwenä, 4 Kegel Gsteini, 5 Kegel Obermatte, 6 Kegel Ullrichen, 7 Kegel Hinnermatt, 8 Kegel Vordermatt, 9 Kegel Wiler, 10 Kegel Louwiggene, 11 Kegel Merex Matte, 12 Kegel Unnerberbel, 13 Kegel Münster, 14 Kegel Brunne, 15 Kegel Egge, 16 Kegel Reckingen, 17 Kegel Überrotten, 18 Kegel Reckingen-Gluringen, 19 Kegel Riti klein, 20 Kegel Riti, 21 Kegel Ritzingen, 22 Kegel Birchlouene, Kegel 23 Bieliger Matte, 24 Kegel Selkingen, 25 Kegel Lärch, 26 Kegel Grüebe, 27 Kegel Blitzingen, 28 Kegel Niederwald. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 von swisstopo.

4 Methoden

Die einzelnen Arbeitsschritte der Methodik sind als Flussdiagramm in Abbildung 4.1 ersichtlich. Sowohl für die Klassierung mittels swissALTI3D als auch für diejenige basierend auf dem DHM25 wurden überwiegend die gleichen Arbeitsschritte durchgeführt. Wo dies nicht zutrifft, wird darauf hingewiesen. Zuerst wird kurz auf die verwendete Software hingewiesen. Die Methodik basiert auf der Verwendung des *Region-growing* Algorithmus. Dessen Funktionsweise wird zu Beginn zusammenfassend beschrieben. Dann wird erklärt, wie die *land-surface parameter*, die Inputs für das *Region-growing*, ausgewählt wurden. Die Beschreibung der DHM Vorbereitung für die Analyse und die Kartierung der Referenzkegel folgen. Der Hauptteil der Methodik bildet die genaue Beschreibung der *land-surface parameter* sowie des *Region-growing* Algorithmus als wichtigste Komponenten des Klassierungsprozesses. Die Evaluation und Statistikberechnungen bilden den Abschluss des Kapitels.

4.1 Software

In dieser Arbeit wurde mit verschiedener Software gearbeitet. Als Basis für grundlegende DHM-Manipulationen wie das Zuweisen von Projektionen, das *clipping* (Auswahl eines Ausschnitts) und die Darstellung der Endprodukte diente ArcGIS desktop von ESRI, insbesondere ArcMap 10.2.2. Zusätzlich wurden einige nützliche Funktionen aus ArcGIS in den Algorithmus implementiert. Wo dies der Fall ist, wird darauf hingewiesen. Weitergehende Manipulationen wie die Berechnung von stark geglätteter Neigung oder Krümmung, sowie die Berechnung des Rauigkeitsindex erfolgten durch die 64bit Version von Python 2.7.7. Das in ArcGIS enthaltene Python 2.7 wurde nicht verwendet, da es eine 32bit Version ist, welche eine Handhabung von grossen Arrays verunmöglicht. Die statistische Analyse und Darstellung der Grafiken wurde mit Microsoft Excel und Matplotlib ¹ durch-

¹N.N. (2013a)

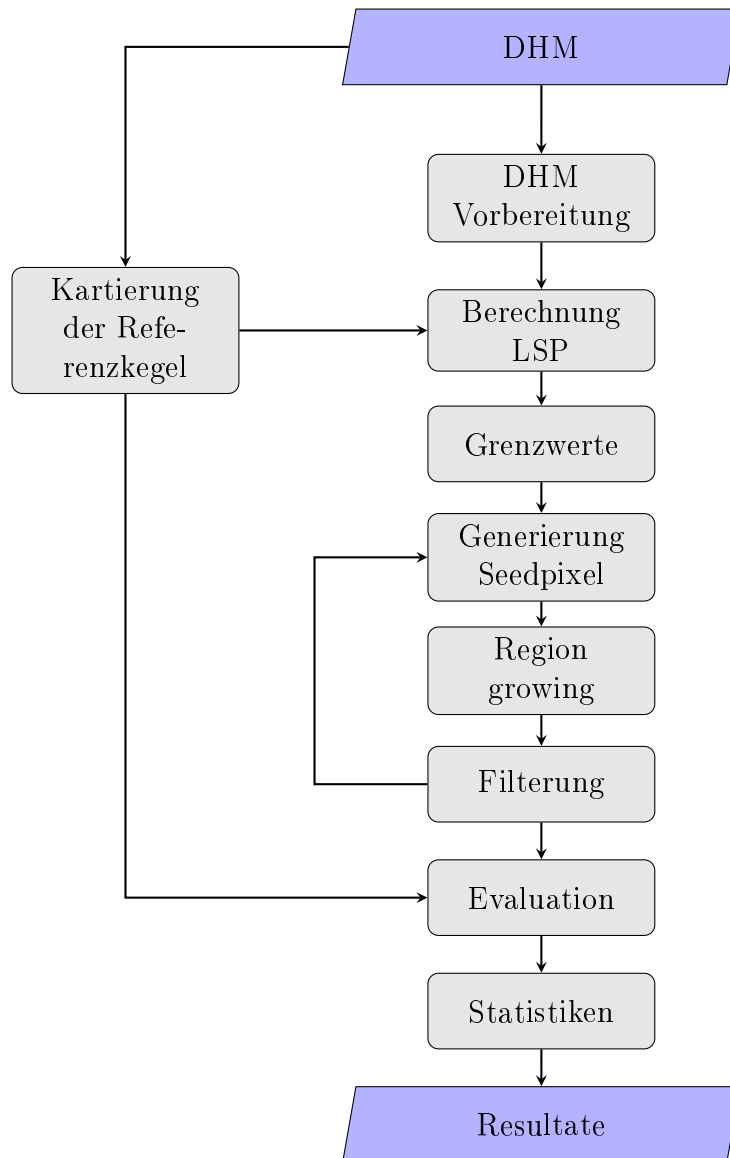


Abbildung 4.1: Methodikübersicht

geführt. Für die effiziente Manipulation von Vektoren, Arrays und Matrizen sowie der Anwendung numerischer Methoden wurde Numpy verwendet, ein Zusatzpaket, das die Funktionen von Python erweitert ². Ein weiteres Zusatzpaket, welches viele Funktionen zur Bildbearbeitung beinhaltet, ist Scipy ³. Beide Pakete wurden für die Berechnungen der *land-surface parameter* verwendet. Zur Darstellung von Python-Funktionen wurde matplotlib verwendet.

4.2 Konzeptueller Ansatz: Klassifikation der Murkegel mittels *Region-growing* Algorithmus

Die Extraktion der Murkegel, welche das Hauptziel dieser Arbeit darstellte, wurde mittels *region-growing* erzielt. Hierbei handelt es sich um einen Algorithmus, der aufgrund vordefinierter Ähnlichkeits- oder Wachstumskriterien Pixel einer Klasse zuweist. Dieses Klassifikationsverfahren findet in der Bildverarbeitung (BÖHNER ET AL., 2006; PITAS, 2000) und spezifisch auch in der Geomorphometrie zur Extraktion von *landforms* (siehe Abschnitt 2.2) oft Verwendung (MILIARETIS & ARGIALAS, 2000; LUCIEER & STEIN, 2005).

Der Algorithmus selber besteht aus zwei Hauptkomponenten. In einem ersten Teil werden sogenannte *Seeds* definiert. Dies sind Pixel, die sich durch bestimmte Eigenschaften besonders dazu eignen, eine Klasse zu repräsentieren, in diesem Falle also typisch für eine Murkegel sind. In der vorliegenden Arbeit wurden sie durch eine Kombination von *land-surface parameter* definiert, welche die Entstehung und Form eines Murkegels möglichst gut beschreibt. In einem zweiten Teil wird die direkte Nachbarschaft der Seedpixel auf ihre Ähnlichkeit zum Seedpixel untersucht. Erfüllt ein Nachbarschaftspixel das Ähnlichkeitskriterium, wird es zur Region hinzugefügt. Anschliessend wird das eben hinzugefügte Nachbarschaftspixel als Seedpixel markiert und neue direkte Nachbarn werden auf ihre Ähnlichkeit überprüft. Dieser Prozess wird so oft wiederholt, bis kein Pixel mehr das Ähnlichkeitskriterium erfüllt oder der Bildrand (in diesem Falle der DHM-Rand) erreicht wird. Durch das wiederholte hinzufügen von Pixeln wachsen Regionen (die Murkegel) an, was dem Algorithmus seinen Namen gibt. Üblicherweise werden verschiedene Klassen de-

²(N.N., 2013b)

³(N.N., 2014)

finiert, so dass das ganze Bild am Ende klassiert ist. Im Unterschied dazu wurden in dieser Arbeit nur Murkegel als Klasse definiert und extrahiert, so dass eine binäre Klassifikation mit Murkegeln und Nicht-Murkegeln entstanden ist.

4.3 Wahl der *land-surface parameter* für den *region-growing* Algorithmus

Der wohl schwierigste und einflussreichste Teil im Bezug auf die Güte der Klassifikation durch den *Region-growing* Algorithmus ist die Definition und Auswahl der Seedpixel (BÖHNER ET AL., 2006; MILIARESIS & ARGIALAS, 2000), insbesondere, wenn nur eine Klasse extrahiert werden soll. Liegen die Seedpixel an falschen Punkten im DHM, so können sich Regionen bilden und ausbreiten, die nichts mit Murkegeln gemein haben, ausser den Eigenschaften, die für die Seedpixel-Definition verwendet wurden. Am Anfang der Definition standen deshalb zwei Fragen:

- Welches sind die geomorphologischen Prozesse, die zu einer Murkegelbildung beitragen?
- Wie lässt sich die typische Murkegel-Form am besten von anderen Formen diskriminieren?

Durch die Literaturstudie und den daraus gewonnenen Erkenntnissen (siehe Abschnitt 2.1) sowie den aus der Feldbegehung im Val Müstair gewonnen Eindrücken, kristallisierten sich folgende Antworten heraus:

1. Zur Murkegelbildung trägt eine Vielfalt von Prozessen bei, jedoch ist der repräsentativste sicherlich der Murgang. Von den Voraussetzungen die für die Entstehung eines Murkegels von Nöten sind, (z.B. Gefälle, hohe Wasserabflussmenge, Lockersediment) lassen sich das Gefälle und das Murgerinne am besten mit Hilfe eines DHM beschreiben.
2. Die typische Kegelform weist im Längenprofil eine gerade bis konvexe Form auf, im Querprofil ist sie ausgesprochen konvex und die Oberfläche ist durch die murgangspezifischen Ablagerungen rau.

Diese Merkmale galt es so zu operationalisieren, dass sie für die Untersuchung des DHM gebraucht werden konnten. Für das Gefälle wurde der *land-surface parameter* lokale Neigung gewählt, für das Murgerinne die Abflussakkumulation. Die im Querprofil konvexe Form des Kegels kann mittels Plankurvatur beschrieben werden und für die raue Oberfläche bot sich der Rauigkeitsindex zur Beschreibung an. Die Operationalisierung ist in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Merkmale der Murkegel und ihre Operationalisierung zu *land-surface parameter*

Beschreibendes Merkmal	Land-surface parameter
Pauschalgefälle des Kegels	Lokale Neigung
Murgerinne	Flussakkumulation
Konvexe Form	Plankurvatur
Rauhe Oberfläche	Rauigkeitsindex

Nach der Auswahl der *land-surface parameter* wurden diese auf ihre Unabhängigkeit zueinander getestet. IWAHASHI & PIKE (2007) erwähnen die Wichtigkeit, dass für Klassifikationsprozesse der Topographie die verwendeten Parameter unabhängig voneinander sind und unterschiedliche topographische Eigenschaften beschreiben. Ansonsten besteht die Gefahr, dass die gleichen topographischen Charakteristika durch mehrere der gewählten Parameter beschrieben werden. Als einfaches Kontrollmittel zur Untersuchung auf Unabhängigkeit schlugen die Autoren eine visuelle Kontrolle vor. Indem man für ein kleines Testgebiet die verschiedenen Parameter berechne und darstelle, lasse sich anhand der Ähnlichkeit von Mustern schnell feststellen, ob zwei Parameter unabhängig voneinander sind oder nicht. Dieser Ansatz besticht durch seine Einfachheit und wurde deshalb auch für die zuvor beschriebenen Parameter angewendet. Ein Vergleich der verschiedenen Parameter ist in der Abbildung 4.2 ersichtlich.

Durch Betrachtung der Abbildungen wird schnell ersichtlich, dass sich die Abflussakkumulation deutlich von den anderen Abbildungen unterscheidet. Die Neigung und Plankurvatur scheinen auf den ersten Blick ähnliche Muster zu erzeugen. Betrachtet man aber in diesen beiden Abbildungen den oberen linken und den unteren rechten Bildrand, so

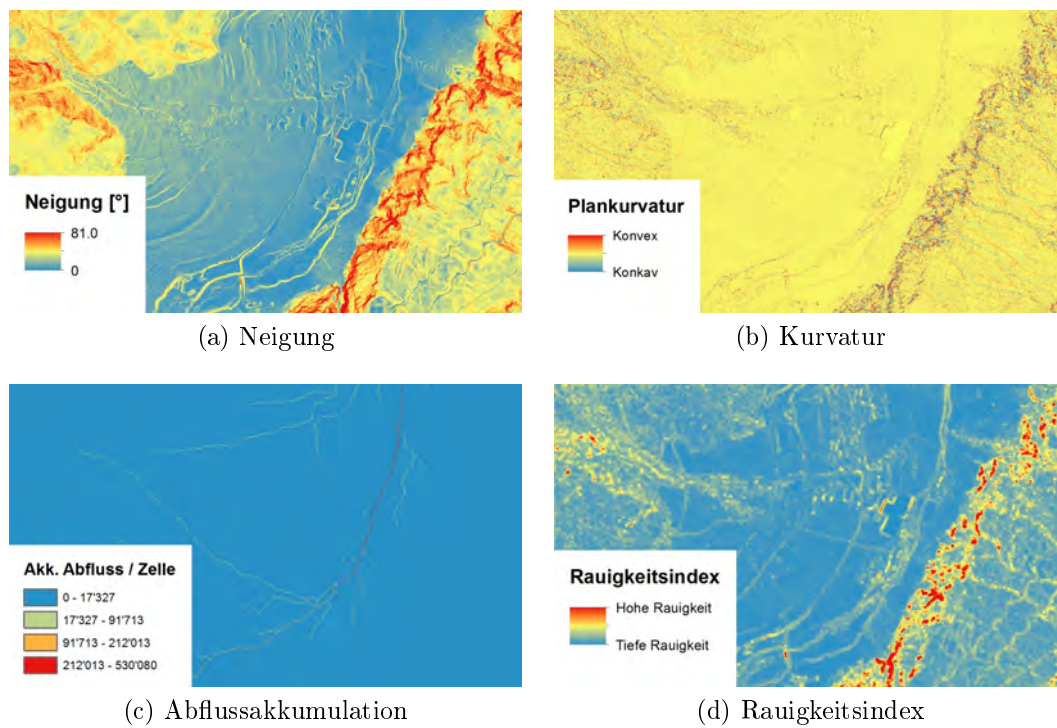


Abbildung 4.2: Neigung, Krümmung, Abflussakkumulation und Rauigkeitsindex für einen Murkegel im Val Müstair. Man beachte die Ähnlichkeit der Krümmung und des Rauigkeitsindex. Verwendete Daten: swissALTI3D von swisstopo.

lassen sich deutliche Unterschiede ausmachen. Einzig die Plankurvatur und der Rauigkeitsindex, auf den später noch genauer eingegangen wird, zeigen sehr ähnliche Muster. Aufgrund dessen wurde auf den Einbezug des Rauigkeitsindex für die Berechnung der Seedpixel verzichtet. Der Grund liegt darin, dass der Rauigkeitsindex lokal zwar auf Rauigkeiten hinweist, die Kurvatur bei einer gewissen Glättung aber weitaus geeigneter ist, um die Form des Kegels zu beschreiben. Der Rauigkeitsindex fand in einem späteren Arbeitsschritt Verwendung (siehe Abschnitt 4.6.5).

Sind die *land-surface parameter* für die Seedpixel definiert und auf Unabhängigkeit getestet worden, so muss nur noch ein Ähnlichkeitskriterium gefunden werden, gemäss welchem Nachbarpixel hinzugefügt werden. Die Neigung schien als Ähnlichkeitskriterium geeignet, denn MILIARESI & ARGIALAS (2000) haben gezeigt, dass sich die Neigung gut für das Wachstum von Kegel-Regionen eignet. Sie beeinflusst die Entwicklung der Topographie wie kein anderer *land-surface parameter* und wird deshalb in vielen geomorphometrischen Klassifikationsverfahren verwendet (IWAHASHI & PIKE, 2007). Ausschlag gab aber vor allem, dass die Neigung direkten Einfluss auf die Murkegelbildung hat. Ist sie zu gross, lagert sich das Material des Murgangs nicht ab, ist sie zu klein, so wird dieses Gebiet nicht von Murgängen erreicht. Ein abrupter, grossräumiger Neigungswechsel ist zudem ein Hinweis, dass die Grenzen eines Murkegels erreicht wurden, da dieser im "Innen" durch einen stetigen Neigungsverlauf charakterisiert ist. Die Neigung, ab der sich Murgänge ablagern bildet die Obergrenze des im *Region-growing* verwendeten Neigungsgrenzwerts und diejenige, ab der sich keine Murgänge mehr ablagern, die Untergrenze. Das Ähnlichkeitskriterium wird durch das Neigungsverhältnis zwischen zwei benachbarten Pixel beschrieben.

4.4 DHM-Verarbeitung

Der erste Schritt der DHM-Verarbeitung bestand im Zuschneiden der jeweiligen DHM auf die Testgebiete. Dazu wurde das clipping-Tool, welches von ArcMap bereitgestellt wird, benutzt. Mittels Arcmap-Tool *raster to ascii* wurden die DHM-Ausschnitte schliesslich in Ascii-Files konvertiert, damit sie für die Weiterverarbeitung in Python verwendet werden konnten. . Ins Ascii-Format konvertierte Dateien bestehen aus einem *header* und einem Hauptteil. Der Header enthält folgende Angaben:

- *ncols*: Anzahl Spalten des Rasters

- `nrows`: Anzahl Zeilen des Rasters
- `xllcorner`: x-Koordinate der linken unteren Rasterecke
- `yllcorner`: y-Koordinate der linken unteren Rasterecke
- `cellsize`: Zellenbreite in Metern
- `NODATA_value`: Vordefinierter Wert für «leere» Zellen oder solche, deren Inhalt nicht verwendet werden soll.

Der Hauptteil repräsentiert das eigentliche Raster und enthält die Zellenwerte. Die Headerinformationen werden für Manipulationen innerhalb von Python nicht benötigt und deshalb entfernt und der Hauptteil schliesslich in einen Array umgewandelt. Hierfür wurde die Funktion `txt_to_numpy_array` verwendet. Diese liest zuerst ein `txt`-file ein, überspringt dann die Headerinformation, was den ersten sechs Zeilen entspricht und wandelt es dann in ein Array um. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es für ArcGIS ein Modul namens `Arcpy` gibt, welches als Schnittstelle zwischen Python und ArcGis dient und viele in ArcGIS verwendeten Funktionen als Skript anbietet. Unter anderem ist eine Funktion namens `RasterToNumPyArray` implementiert, welche eine direkte Konversion vom ESRI Rasterformat zum Python Array erlauben würde. Diese wurde aber aus zwei Gründen nicht verwendet. Einerseits waren die Arrays, mit welchen gearbeitet wurde, sehr gross, da die Zellenbreite eines der verwendeten Raster sehr klein war. Die Grösse der Arrays führte dazu, dass `Arcpy`, welches zu dieser Zeit nur mit einer 32bit Version von Python kompatibel war, nicht verwendet werden konnte, da das Speicherlimit schnell überschritten wurde. Andererseits ermöglichte eine eigene Implementierung die Manipulation der Headerinformationen. Wieso das wichtig ist, wird im Abschnitt 4.6.2 genauer erklärt.

4.5 Digitalisieren der Trainingskegel

Um die für Murkegel typischen Werte der *land-surface parameter* zu eruieren und eine Evaluation der Klassifikation zu ermöglichen, wurden sämtliche Murkegel im Val Müstair, dem Mattertal und Goms kartiert. Die Kegel des Val Müstairs wurden als Trainingskegel verwendet, die restlichen dienten als Referenz für die Evaluation der Klassifikation.

4.5.1 Verwendete Datensätze

Die Grundlage für die Kartierung bildete eine Schummerung (*Hillshade*) des swissALTI3D. Durch diese konnten Änderungen in der Neigung und Exposition, wie sie etwa in den Übergangsbereichen zwischen Kegelrand und Bergflanke vorkommen, durch Helligkeitsvariationen gut erkannt werden. Die Belichtungsrichtung der Schummerung wurde jeweils geändert, um einen anderen visuellen Eindruck zu erlangen. Somit konnten Gebiete, die zuvor durch die Belichtungsrichtung zu hell oder zu dunkel waren, besser untersucht werden. Die hohe vertikale und horizontale Auflösung des swissALTI3D, sowie die verschiedenen Belichtungsrichtung der gleichen Szenerie erlaubten zum Teil eine sehr genaue Interpretation der Kegelform, reichten aber nicht immer aus. Hinzu kommt, dass das Ergebnis einer Kartierung auch von dem verwendeten Datensatz abhängt. Um eine möglichst fehlerfreie Kartierung zu erlauben, wurden deshalb zusätzliche Datensätze verwendet. Unter anderem wurde die digitalisierte Landeskarte im Rasterformat im Massstab 1:25000 (pk25) von swisstopo verwendet (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE, 2012a). Bei dieser waren vor allem die Höhenlinien als auch die Verläufe der Gerinne sehr hilfreich, um die Kegelformen einzugrenzen. Die pk25 wurde zur Untersuchung als Layer über die Schummerung des swissALTI3D gelegt und leicht transparent dargestellt, damit man die Schummerung darunter noch sehen konnte. Durch diese Kombination konnten anthropogene Objekte (beispielsweise Strassen) erkannt werden, die ohne Pixelkarte als eine natürliche Begrenzung des Kegels hätten interpretiert werden können. Bei sehr flachen Kegeln oder solchen mit sehr flachem Kegelfuss war die Äquidistanz zwischen den Höhenlinien der pk25 zu gross um den genauen Kegelverlauf dazwischen feststellen zu können. Deshalb wurde in Arcmap noch das Werkzeug *contours* verwendet, welches anhand der Höheninformation des DHM Höhenlinien in einem durch den User zu definierenden Abstand darstellt. Als Äquidistanz wurden fünf Meter gewählt. Schliesslich wurden noch hoch aufgelöste Luftbilder von swisstopo verwendet (BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE, 2010). Diese wurden in Kombination mit den Höhenlinien verwendet, um Schuttkegel von Murkegeln zu unterscheiden. Schuttkegel die durch Sturzprozesse entstanden sind, weisen normalerweise eine deutlich grössere Neigung auf (LOUIS, 1968). Dies ist an eng beieinander liegenden Höhenlinien zu erkennen. Zusätzlich bestehen sie hauptsächlich aus Schutt, während Murkegel eine zumindest teilweise Vegetationsbedeckung aufweisen. Dieser Un-

terschied lässt sich anhand der Luftbilder gut erkennen. Abbildung 4.3 zeigt Beispiele der verwendeten Datensätze, angeordnet in der Verwendungsreihenfolge.

4.5.2 Kartierungsmethodik

Die Murkegel wurden als Polygone in ArcMap digitalisiert. Hierzu wurde zuerst in ArcCatalog ein Shapefile generiert, welchem das gleiche geodätische Datum und Koordinatensystem von swissALTI3D zugewiesen wurde (CH1903+ LV95). Jedes Polygon erhielt automatische *unique identifier* (UID) und wurde zusätzlich noch mit den Attributen Namen und Fläche ergänzt. Mittels Editing-Tool in ArcMap wurden dann die Konturen der Murkegel nachgezeichnet. Als Unterlage wurde die Schummerung des swissALTI3D und die leicht transparente Pixelkarte pk25 verwendet (Abbildung 4.3 a) und b)). Zeitweise wurden die *contours* oder die Luftbilder eingeblendet. Die seitlichen Murkegelränder wurden mit Hilfe von Knickpunkten in den Höhenlinien und der Helligkeitsänderung in der Schummerung gezeichnet, indem die Knickpunkte durch Segmente miteinander verbunden wurden. Wo der Kegelrand zwischen zwei Knickpunkten nicht linear verlief, wurde die Schummerung als Referenz für den Verlauf verwendet. Der Kegelansatz, also der oberste Punkt des Murkegels am Kegelhals, stellte eine erste Unsicherheit dar. Es war anhand der verwendeten Datensätze nicht immer klar, wo der Murkegel jeweils beginnt. Der Punkt, an welchem das Gefälle so abnimmt, dass erste Materialablagerungen stattfinden können wurde definiert, indem der Schnittpunkt der Verlängerung der seitlichen Kegelränder eruiert wurde und von da an entlang des Gerinne eine weitere Äquidistanz an Höhe hinzugefügt wurde. Der Auslaufbereich des Kegels, also der Kegelfuss, stellte in Bezug auf die Fläche sicherlich die grösste Unsicherheit dar. Als Erkennungsmerkmal für den unteren Rand des Kegelfusses dienten drei Hinweise. Waren die Murkegel relativ steil und das Tal, in welches sie mündeten, relativ breit, so war der Wechsel zwischen Kegelfuss und Tal relativ gut als Helligkeitsunterschied in der Schummerung erkennbar. War der Kegel steil und das Tal sehr eng, so wurde der Kegel meist durch den im Tal verlaufenden Fluss begrenzt. Schwierig wurde es bei flachen Kegeln. Hier wurde meist die unterste durch das *contours*-tool modellierte Höhenlinie verwendet (Abb. 4.3 e), die eine konvexe Form beschrieb. Die digitalisierten Murkegelpolygone wurden dann in Rasterflächen umgewandelt, damit zonale Statistiken für sie ausgerechnet werden konnten und um die Evaluation der modellierten Murkegel,

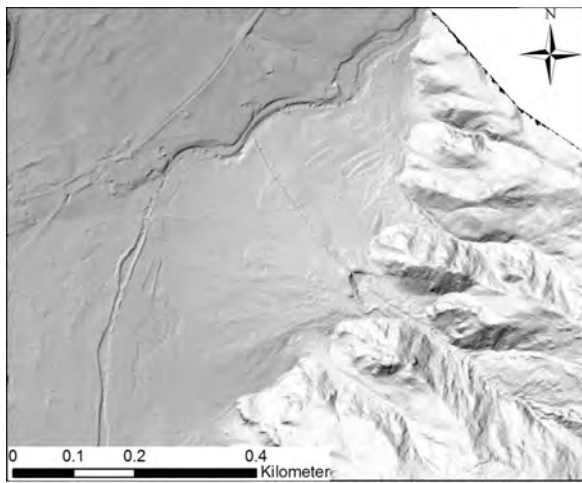
die im Rasterformat vorliegen würden, zu ermöglichen.

4.5.3 Unsicherheiten in der Kartierung

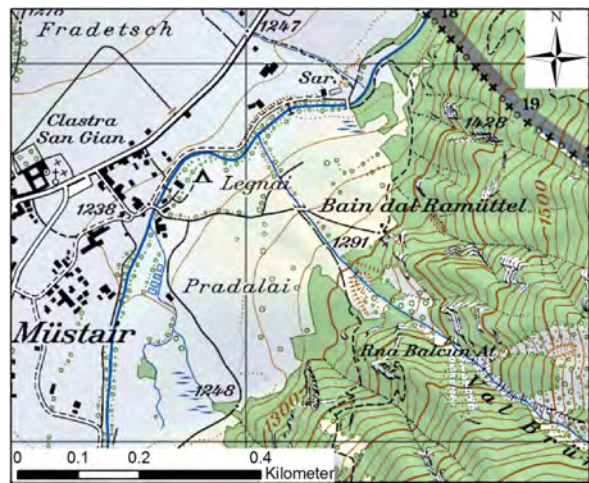
Grundsätzlich wurde versucht, nach den in der Geomorphologie üblichen Kartierungsmethoden für digitale Datensätze gemäss (SMITH, 2011) vorzugehen. Jedoch ist die in dieser Arbeit verwendete Kartierung mit verschiedenen Unsicherheiten behaftet. Eine wurde schon im Abschnitt 4.5.2 erwähnt: Die Unsicherheit bezüglich der genauen Grenzverläufe des Kegelhalses und Kegelfusses können einen erheblichen Einfluss auf die Fläche des Kegels haben, je nachdem wo die Grenzen gezogen werden. Hier spielt auch die zweite Unsicherheit mit hinein. Solche Grenzziehungen und generell Formenerkennungen sind zu einem gewissen Teil immer subjektiv. Das heisst, sie sind von der Erfahrung und Interpretation des Kartierenden abhängig (SMITH, 2011). Fehler oder Unsicherheiten können auch durch die Datengrundlage bestehen. Als konkretes Beispiel sei hier das swissALTI3D genannt. Daraus wurden Höhenlinien in einer Äquidistanz von fünf Metern zueinander abgeleitet. Die Geländeoberfläche des swissALTI3D wurde aber mittels Interpolation von einer diskreten Punktwolke zur kontinuierlichen Oberfläche (siehe Abschnitt 2.3.6). Es kann also durchaus sein, dass die Lage der Knickpunkte der Höhenlinien und die der Höhenlinien selber nicht genau ist. Auch wenn versucht wurde, Unsicherheiten der Datensätze zu minimieren, in dem verschiedene Datensätze aus verschiedenen Quellen berücksichtigt wurden, muss doch mit gewissen Fehlern gerechnet werden. Eine Unsicherheit entsteht auch durch die Konversion der Polygone in Rasterflächen. Es bräuchte infinitesimal kleine Rasterzellen, um der Genauigkeit eines vektor-basierten Datensatzes zu entsprechen, was jedoch in der Realität unmöglich ist. So müssen Genauigkeitseinbussen bei jeder Konversion von Vektor zu Raster und umgekehrt in Kauf genommen werden.

4.6 Berechnung der *land-surface parameter*

Im folgenden Abschnitt wird der wichtigste Teil der Methoden erklärt: Die Berechnung der *land-surface parameter* welche für die Seedpixel-Definition als auch für das Region-growing und die Nachfilterung dienen. Zuerst wird gezeigt, wie die Oberfläche zur Berechnung der Neigung und Krümmung modelliert wurde. Dann folgen die Beschreibungen der Neigung



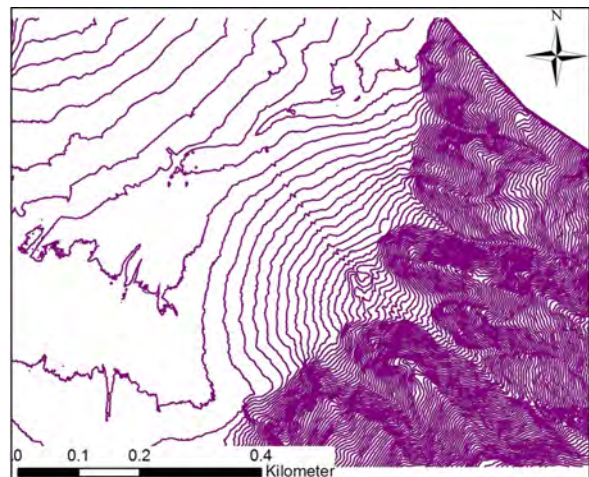
(a) Schummerung



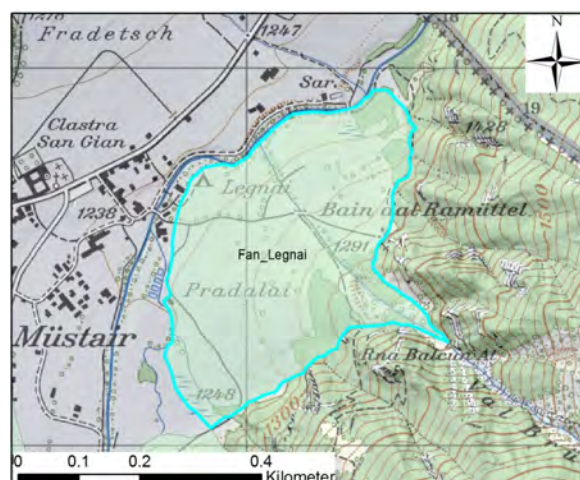
(b) Pixelkarte im Massstab 1:25000



(c) Luftbild



(d) Höhenlinien mit Äquidistanz = 5m



(e) Murkegelpolygon mit Schummerung und Pixelkarte, leicht transparent

40

Abbildung 4.3: Für die Kartierung der Murkegel verwendete Datensätze. Grundlage bildeten die Schummerung des DHM und die Pixelkarte. Zusätzlich wurden Höhenlinien und Luftbilder hinzugezogen. Verwendete Datensätze von swisstopo: Digitale Pixelkarte 1:25000, Hillshade swissALTI3D, Luftbilder swissimage.

(erste Ableitung der Oberfläche) und der Krümmung (zweite Ableitung der Oberfläche), sowie Angaben zur Grenzwertwahl und Glättung dieser *land-surface parameter*. Anschliessend wird auf die Abflussakkumulation genauer eingegangen. Zum Schluss wird der Rauigkeitsindex vorgestellt.

4.6.1 Modellierung der Oberfläche

Will man die Neigung oder die Krümmung an einer beliebigen Stelle des digitalen Höhenmodells berechnen, so muss eine Oberfläche an das Raster angepasst werden. Im Englischen spricht man von *surface-* oder *curve-fitting*. Dabei wird eine Oberfläche mathematisch so beschrieben, dass sie sich möglichst gut an die Höhenwerte der Rasterzellen anpasst. Dazu wird meist eine Polynomfunktion n -ten Grades verwendet. Verschiedene Ansätze dazu werden in (JONES, 1998) und OLAYA (2009) präsentiert. Jeder dieser Algorithmen hat Vor- und Nachteile. In dieser Arbeit wurde der Ansatz von (WOOD, 1996) verwendet, der die Geländeoberfläche mittels einer quadratischen Funktion basierend auf sechs Koeffizienten beschreibt. (JONES, 1998) hat verschiedene Ansätze zur Berechnung der Neigung untersucht. In seiner Arbeit schnitt Wood's Ansatz relativ gut ab aber es gab auch Ansätze, die ein besseres Ergebnis erzielten. Wood's Methode wurde gewählt, weil er eine allgemeine Matrixlösung für die Berechnung seines Polynom zweiten Grades beschreibt und sehr genau dokumentiert. Normalerweise wird für die Berechnung der Neigung oder Krümmung an einem Pixel eine 3 x 3 Pixel-Nachbarschaft verwendet, so zum Beispiel in den Algorithmen, die in ArcGis implementiert sind. Das heisst, dass für die Berechnung des Werts des zentralen Pixels die acht nächsten Nachbarn hinzugezogen werden. Dies wird für jedes Pixel im DHM gemacht, so dass ein "gleitendes Fenster" mit Fenstergrösse 3 x 3 Pixel entsteht. Die allgemeine Matrixlösung erlaubt eine Modellierung der Oberfläche mit $n \times n$ Pixel, was insbesondere dann von Vorteil ist, wenn die Oberfläche geglättet werden soll, weil beispielsweise die Topographie zu rau ist.

In den folgenden Paragraphen wird die Modellierung der Oberfläche gemäss WOOD (1996) beschrieben. Die genauen (mathematischen) Herleitungen sind seiner Arbeit entnommen und können da nachgelesen werden. Sie wurden in python in den Funktionen `nxn_slope` und `nxn_curv` implementiert. Wo nötig, wird die Beschreibung der Oberflächenmodellierung durch einen Pseudocode des Python codes ergänzt.

Wie bereits erwähnt, basiert die Oberflächenmodellierung durch Wood auf einem Polynom

zweiter Ordnung. Dieses nimmt folgende Form an:

$$z = ax^2 + by^2 + cxy + dx + ey + f \quad (4.1)$$

wobei x und y den geometrischen Koordinaten der jeweiligen Rasterzelle und z der modellierten Oberflächenhöhe entsprechen und a bis f den Koeffizienten sind, welche zur Lösung der Gleichung gesucht werden. Wood löst die Gleichung 4.1 mit der Methode der kleinsten Quadrate. Als allgemeine Lösung für ein gleitendes Fenster mit Grösse $n \times n$ Pixel muss eine Matrixlösung hergeleitet werden. Diese erhält Wood durch das Auf- und Umstellen von Normalgleichungen. Sie sieht folgendermassen aus:

$$\begin{pmatrix} \sum x_i^4 & \sum x_i^2 y_i^2 & 0 & 0 & 0 & \sum x_i^2 \\ \sum x_i^2 y_i^2 & \sum x_i^4 & 0 & 0 & 0 & \sum x_i^2 \\ 0 & 0 & \sum x_i^2 y_i^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum x_i^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \sum x_i^2 & 0 \\ \sum x_i^2 & \sum x_i^2 & 0 & 0 & 0 & N \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum z_i x_i^2 \\ \sum z_i y_i^2 \\ \sum z_i x_i y_i \\ \sum z_i x_i \\ \sum z_i y_i \\ \sum z_i \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Die Ausdrücke auf der linken Seite der Gleichung 4.2 stellen Konstanten dar. Diese müssen gemäss Wood für jede Grösse des gleitenden Fensters nur einmal ausgerechnet werden. In seiner Arbeit beschreibt er die Berechnung detailliert anhand eines Pseudocodes. Dieser wurde zur Berechnung der Neigung und Krümmung verwendet. Die rechte Seite der Gleichung 4.2 ist nicht konstant, da sie von den jeweiligen Höhen z_i der Zellen innerhalb des gleitenden Fensters abhängt. Die Berechnung der rechten Seite wurde eigenständig implementiert. Deshalb folgt eine Beschreibung dieser Implementierung. Auf die Verwendung des Quellcodes innerhalb der Arbeit wird aus Gründen der Lesbarkeit verzichtet, die Beschreibung jedoch mit Pseudocode ergänzt. Der Quellcode ist auf der beiliegenden CD vorhanden.

Der erste Schritt zur Berechnung der Ausdrücke auf der rechten Seite von Gleichung 4.2 war, die Initialisierung der Konstantenmatrizen x_i , y_i . Daraus liessen sich dann direkt die Matrizen $x_i y_i$, x_i^2 und y_i^2 ableiten. Zu Beginn wurde x_i als einspaltiger Vektor mit n Einträgen initialisiert, wobei n der Breite des gleitenden Fensters (Anzahl Pixel) entsprach. Die Werte der Einträge ergeben sich aus der relativen Entfernung vom lokalen Nullpunkt, also der Zentralzelle des gleitenden Fensters, multipliziert mit der Zellenbreite (siehe Ab-

bildung 4.4). Für das Beispiel eines 5 x 5 Pixel grossen Fenster ergeben sich die Werte

x-Koordinaten	-2 w / -2w	-2w / -1w	-2w / 0	-2 w/ 1w	-2 w/ 2w
	- 1 w/ -2w	- 1w / -1w	- 1w/ 0	- 1w / 1w	- 1 w/ 2w
	0 / -2w	0 / -1 w	0 / 0	0 / 1 w	0 / 2w
	1 w/ -2w	1w/ -1w	1 w/ 0	1w/ 1w	1 w/ 2w
	2 w/ -2w	2 w/ -1w	2 w/ 0	2 w/ 1w	2 w/ 2w
	y-Koordinaten				

Abbildung 4.4: Lokales Koordinatensystem eines gleitenden Nachbarschaftsfensters mit Nullpunkt bei der Zentralzelle. Koordinaten ergeben sich durch die relative Position der Zelle zur Zentralzelle multipliziert mit der Zellenweite w . Nach (WOOD, 1996).

von $-2 * w$ bis $2 * w$, da die äussersten Zellen (Kantenzellen) von der Zentralzelle jeweils zwei Zellen weit entfernt sind. Etwas allgemeiner ausgedrückt beträgt der Abstand der Kantenzellen zur Zentralzelle $+/- \frac{(n-1)}{2}$ Zellen. Der Vektor wurde gefüllt, indem von $-\frac{(n-1)}{2}$ bis $\frac{(n-1)}{2}$ iteriert wurde, wobei i der aktuellen Zelle entsprach und mit der Zellenbreite multipliziert wurde. Jeder Wert für i wurde dann dem Vektor hinzugefügt.

```

1 Kante = (n-1)/2
2 i = -Kante
3 solange i <= Kante:
4     Wert = i * Zellenbreite
5     Fuege Wert dem Vektor hinzu
6     i += 1

```

Der Zeilenvektor mit Grösse 5×1 musste nun in eine 5×5 -Matrix konvertiert werden. Dies wurde durch elementweise Multiplikation mit einem durch Einsen gefüllten Spaltenvektor erreicht. Im Fall eines 5×5 gleitenden Fensters resultiert die x-Koordinatenmatrix:

$$\begin{pmatrix} -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \\ -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \\ -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \\ -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \\ -4 & -2 & 0 & 2 & 4 \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Die y-Koordinatenmatrix erhält man durch Transposition der x-Koordinatenmatrix.

$$\begin{pmatrix} -4 & -4 & -4 & -4 & -4 \\ -2 & -2 & -2 & -2 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 2 & 2 & 2 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Die Matrizen $x_i y_i$, x_i^2 und y_i^2 erhält man wiederum mit elementweiser Multiplikation (nicht Matrixmultiplikation). So ergibt sich beispielsweise die Matrix $x_i y_i$, indem man die Einträge von x_i mit den Einträgen von y_i multipliziert.

Der nächste Schritt bestand in der Extraktion der z_i -Matrix aus dem DHM. Bei der z_i -Matrix handelt es sich um nichts anderes als das eigentliche gleitende Fenster mit Dimension $n \times n$ Pixel (5×5 im obigen Beispiel), welches die aktuellen Höhenwerte des DHM enthält. Im Gegensatz zu den vorgängig erwähnten Matrizen x_i etc., ändern sich diese Höhenwerte mit jeder neuen Positionierung des gleitenden Fensters.

```

1 fuer (x=1; x < Laenge von DHM; x +=1)
2   fuer (y=1; y < Breite von DHM; y += 1)
3     falls x < (Laenge von DHM - n) UND y < (Breite von DHM - n)
4       zi = DHM[x:x+b, y:y+b]

```

In den ersten zwei Zeilen wurde durch das gesamte DHM iteriert⁴. Die Dritte Zeile spezifiziert, dass das gleitende Fenster z_i nur dann extrahiert werden soll, falls die x- und y- Koordinaten der momentanen Positionen kleiner sind als die DHM-Breite bzw. Länge - Fensterbreite n . Fehlt diese Zeile, tritt der Fehler *indexing out of bounds* auf. Der Python-*Interpreter* versucht dann über die Grenzen des DHM hinaus zu iterieren, was nicht möglich ist. Durch das Verhindern des *indexing out of bounds* wird aber nicht das ganze DHM abgetastet, was dazu führt, dass das resultierende Raster um $n - 1$ Pixel kürzere Kanten hat, als das Ursprungs-DHM. Diese Problematik wird genauer in Abschnitt 4.6.2 erläutert.

z_i konnte nun mit den konstanten Matrizen multipliziert werden. Die Elemente der resultierenden Matrizen wurden schliesslich aufsummiert⁵, womit die rechte Seite von Gleichung 4.2 auch berechnet war. Nun kann die Gleichung mittels Methode kleinster Quadrate aufgelöst werden, um die Konstanten $a - f$ zu erhalten. Dazu wurde eine *Numpy*-Funktion⁶ verwendet, die auch die Inversion der Koeffizientenmatrix auf der linken Seite der Gleichung 4.2 vornimmt.

Mittels der Konstanten kann die Neigung und Krümmung direkt berechnet werden. Zur Überprüfung der modellierten Oberfläche, kann es aber nicht schaden, diese gegen das Ursprungs-DHM darzustellen. Um die modellierte Oberfläche zu generieren wurde zuerst ein Array Z initialisiert, welches mit Nullen gefüllt war und dessen Dimension in diesem Beispiel 5 x 5 Zellen betrug. Danach wurde durch Z iteriert. Für jeden Iterationsschritt wurde der Höhenwert gemäss der quadratischen Ebenengleichung 4.1 berechnet und danach in Z eingefügt.

```

1 fuer (x=1; x < Laenge von Z; x +=1)

```

⁴Numpy bietet dafür die Funktion *ndenumerate* an, welche die Zeilen 1 und 2 in 4.6.1 in kompakter Form schreibt und einiges effizienter ist. Die Schreibweise in 4.6.1 wurde gewählt, da sie verständlicher ist.

⁵Für das Multiplizieren und Aufsummieren wurden die Funktionen *numpy.multiply* und *numpy.sum* verwendet.

⁶*numpy.linalg.lstsq*

```

2 fuer (y=1; y < Breite von Z; y += 1)
3   zi = a*(xi[x,y])**2 + b*(yi[x,y])**2 + c*(xi[x,y]*yi[x,y]) +
4     d*(xi[x,y]) + e * yi[x,y] + f
5   Z[x,y]=zi

```

Die Matrizen xi und yi zusammengesetzt ergaben das Koordinatensystem der X-Y-Ebene, über welcher die neu generierte Oberfläche wie auch der korrespondierende Ausschnitt des DHM dargestellt und verglichen werden.

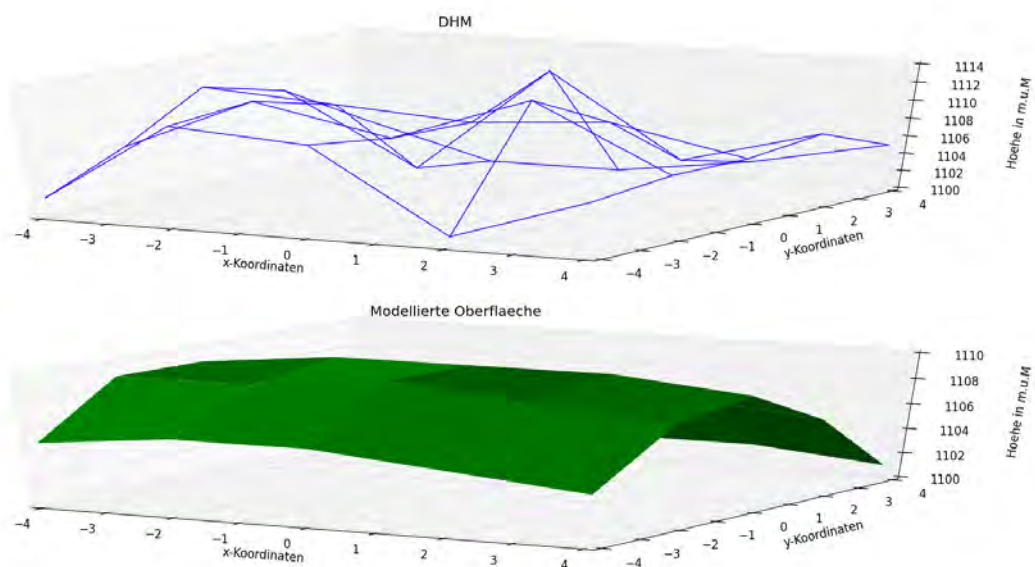


Abbildung 4.5: DHM vs. modellierte Oberfläche.

Betrachtet man die beiden Abbildungen, so fällt die Glättung der Oberfläche sofort auf. Da für die Modellierung ein Polynom zweiten Grades verwendet wurde, werden die einzelnen Senken und Gipfel nicht der Wahrheit entsprechend nachgebildet. Auch verleihen die beiden lokalen Maxima im DHM der modellierten Fläche seine konvexe Form. Die grundlegende Charakteristik der durch das DHM wiedergegebenen Topographie bleibt aber beibehalten. Je grösser das gleitende Fenster gewählt wird, desto glatter wird die Oberfläche modelliert.

4.6.2 Neigung

Berechnung

Die Neigung bildete die Basis für die Kegelextraktion und wurde sowohl für die Generierung der Seedpixel als auch als Ähnlichkeitskriterium im *Region-growing* Algorithmus verwendet. Sie kann durch die erste Ableitung der modellierten Fläche für jede einzelne Zelle lokal berechnet werden. In WOOD (1996) ist sie folgendermassen definiert:

$$\frac{dz}{dxy} = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (4.5)$$

Wendet man die partiellen Ableitungen auf die quadratische Funktion der Gleichung 4.1 an, so ergibt das

$$\begin{aligned} \frac{\partial z}{\partial x} &= 2ax + cy + d \\ \frac{\partial z}{\partial y} &= 2by + cx + e \end{aligned} \quad (4.6)$$

An dieser Stelle sei nochmal die Matrix in Abbildung 4.4 in Erinnerung gerufen. Die Zentralzelle besitzt da die Koordinaten $x = 0$ und $y = 0$. Da jeweils die Neigung für die Zentralzelle berechnet wird, reduzieren sich die beiden Ableitungen in 4.6 auf $\frac{\partial z}{\partial x} = d$ und $\frac{\partial z}{\partial y} = e$. Kombiniert man 4.5 mit 4.6, ergibt sich daher:

$$\frac{dz}{dxy} = \sqrt{d^2 + e^2} \quad (4.7)$$

In Grad ausgedrückt entspricht das

$$slope = \arctan(\sqrt{d^2 + e^2}) \quad (4.8)$$

In Python wurden die Oberflächenmodellierung und die Neigung in der gleichen Funktion `slope_nxn` berechnet. Vor der Oberflächenmodellierung wurde ein leeres Neigungsarray initialisiert. Nach der Berechnung der Konstanten (siehe 4.6.1) konnten diese in Formel 4.8 eingefügt werden. Die einzelnen Neigungswerte wurden schliesslich dem Neigungsarray

übergeben. Dieses wurde dann direkt als txt-File abgespeichert, um es dann in ein ASCII-file mit *header* konvertieren zu können.

Grenzwertproblem der Nachbarschaft

Im Abschnitt 4.4 wurde angegeben, dass die Manipulation des Headers wichtig ist. Zudem wurde im Abschnitt 4.6.1 darauf hingewiesen, dass mit einem gleitenden Fenster nicht das ganze DHM abgetastet werden kann. Dies hat den Grund, dass für die Berechnung der Zentralzelle immer mindestens die nächsten 8 Nachbarn vorhanden sein müssen. Für Zellen in Randregionen des DHM ist dies jedoch nicht möglich, weil sie nicht 8 Nachbarn innerhalb des DHM besitzen. Veranschaulicht wird das in der folgenden Abbildung 4.6. In diesem Beispiel gleitet ein Fenster der Grösse 3 x 3 Pixel über das DHM. Die blauen Zellen stellen jeweils die Zentralzellen dar. In a) ist die erste Zentralzelle abgebildet, für die ein Neigungswert berechnet werden kann. Dann gleitet das Fenster jeweils zur nächsten (Abbildung b) bis es wieder an den Rand des DHM stösst (Abbildung c). Das Endresultat ist ein Raster das um jeweils $(n - 1)$ Pixel kürzere Kanten aufweist.

Dieses Grenzwertproblem wird üblicherweise gehandhabt, indem das Ursprungs-DHM um die Anzahl Pixel im Randbereich vergrössert wird, deren es für die Berechnung der Zentralzelle bedarf. Für die zusätzlichen Pixel ist aber keine Höheninformation vorhanden, so dass Werte angenommen werden müssen. Üblicherweise wird dabei der Wert der benachbarten Zelle (also der vorher äussersten DHM-Zelle) übernommen. Je grösser das gleitende Fenster gewählt wird, desto mehr Zellen müssen am Rande des DHM hinzugefügt werden. Bei einer Fenstergrösse von 3 x 3 Pixeln müssen jeweils zwei Spalten und zwei Reihen hinzugefügt werden, bei 5 x 5 Pixeln sind es jeweils vier Spalten usw. Das führt aber dazu, dass die Werte am Rande des vergrösserten DHM immer mehr von der Realität abweichen. Deshalb wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, das DHM zusätzlich zu vergrössern. Stattdessen wurde in Kauf genommen, dass das Resultat-Raster kleiner ist als das DHM. Aufgrund dieses Kompromisses war es auch wichtig, dass der Header der ASCII-Datei entsprechend manipuliert werden kann. Durch das kleinere Resultat-Raster verändern sich nämlich die Anzahl Zeilen und Spalten, sowie die Koordinaten für die linke untere Ecke des Rasters (siehe auch 4.4). Allgemein können die Positionsänderungen wie folgt ausgedrückt werden:

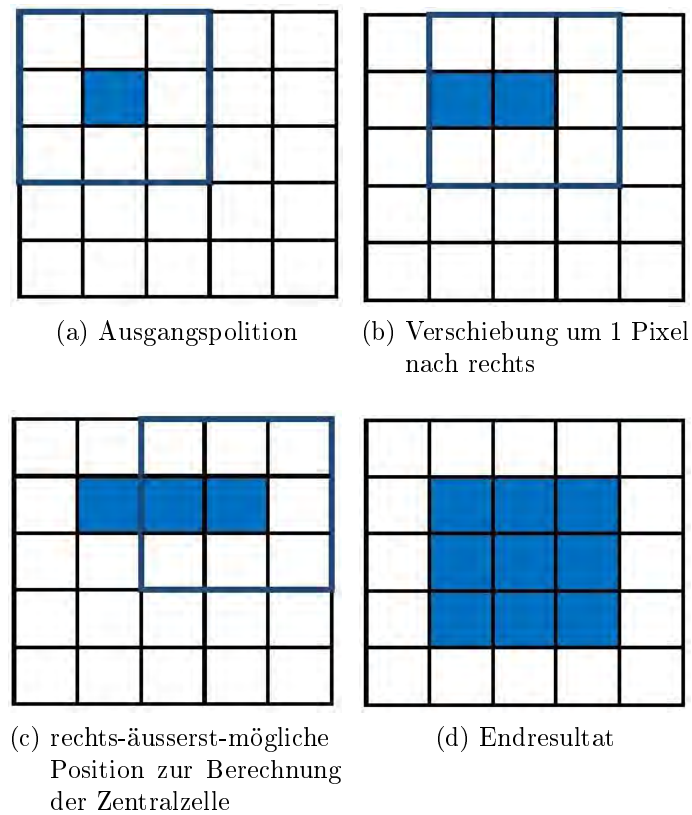


Abbildung 4.6: Schematische Darstellung einer Abtastung eines DHM mittels gleitendem Fenster.

- neue Kantenlänge L_n , Kantenbreite B_n des Rasters

$$\begin{aligned} L_n &= L - (n - 1) \\ B_n &= B - (n - 1) \end{aligned} \quad (4.9)$$

- Verschiebung in x- und y-Richtung

$$\begin{aligned} XLL_{Neu} &= XLL + \frac{(n - 1) \cdot w}{2} \\ YLL_{Neu} &= XLL + \frac{(n - 1) \cdot w}{2} \end{aligned} \quad (4.10)$$

wobei L_n und B_n für die neue Länge und Breite des Rasters stehen, n wiederum die Fensterbreite des gleitenden Fensters ist und w für die Zellenbreite steht.

Auswahl der Nachbarschaft

Um die geeigneten Parameter der Neigung zu finden, welche die Murkegel am besten repräsentieren, wurden zuerst nach der am besten geeigneten Breite des gleitenden Fensters für die Neigungsberechnung gesucht und anschliessend wurden obere und untere Grenzwerte für den *Region-growing* Algorithmus getestet.

Für das swissALTI3D wurde nicht die übliche 3 x 3 Nachbarschaft zur Berechnung der Neigung verwendet. Durch die hohe Auflösung dieses DHM können auf kleinstem Raume sehr grosse Neigungsunterschiede beobachtet werden, welche aber bei der Bildung des Murkegels keinen Einfluss hatten. Diese lokale Variabilität widerspiegelt demzufolge nicht die typischen Neigungsverläufe, welche einen Murkegel charakterisieren. Des Weiteren sind die typischen Neigungen, welche für Murkegel genannt werden (siehe 2.1), nicht auf die durch eine lokale Nachbarschaft berechnete Neigung bezogen. Eher beziehen sich diese Neigungen auf Distanzen, welche für ganze Murkegel typisch sind (z.B. Kegelhals - Kegelfuss). Bei der Wahl von zu grossen Nachbarschaften läuft man allerdings die Gefahr, dass die Topographie zu stark geglättet wird, so dass typische Oberflächenmerkmale, die einen Murkegel definieren, verschwinden. Eine ähnliche Beobachtung haben SMITH ET AL. (2006) gemacht.

Für das swissALTI3D wurden verschiedene Nachbarschaftsgrössen zur Berechnung der Neigung. Die optimale Kombination sollte innerhalb der Kegel möglichst homogene Neigungsverläufe aufweisen und diese zugleich klar von anderen Formen unterscheiden. Es wurden Nachbarschaftsgrössen von 5 x 5, 11 x 11, 25 x 25 und 51 x 51 Pixel getestet, mit entsprechenden Weiten von 10 x 10, 22 x 22, 52 x 52 und 102 x 102 Metern. Die optimale Nachbarschaftsgrösse wurde dann anhand visueller Überprüfung gewählt. Hierbei ist anzumerken, dass die visuelle Überprüfung eine sehr subjektive Methode ist. Besser wäre es gewesen, je eine Klassierung der Murkegel pro Nachbarschaftsgrösse durchzuführen und dann die Genauigkeitsunterschiede zu untersuchen, beispielsweise gemäss SMITH ET AL. (2006). Zusätzlich hätte man die Sensitivität der Klassierung in Bezug auf Nachbarschaftsgrösse beschreiben können. Diese beiden Schritte wurden aufgrund von Zeitmangel jedoch unterlassen. Abbildung 4.7 zeigt die Auswirkung unterschiedlicher Nachbarschaftsgrössen für den Kegel von Müstair.

Abbildung a) zeigt die Neigung, welche mit der kleinsten Nachbarschaft berechnet wurde. Erwartungsgemäss sind hier die lokalen Neigungsunterschiede am grössten. Die Unter-

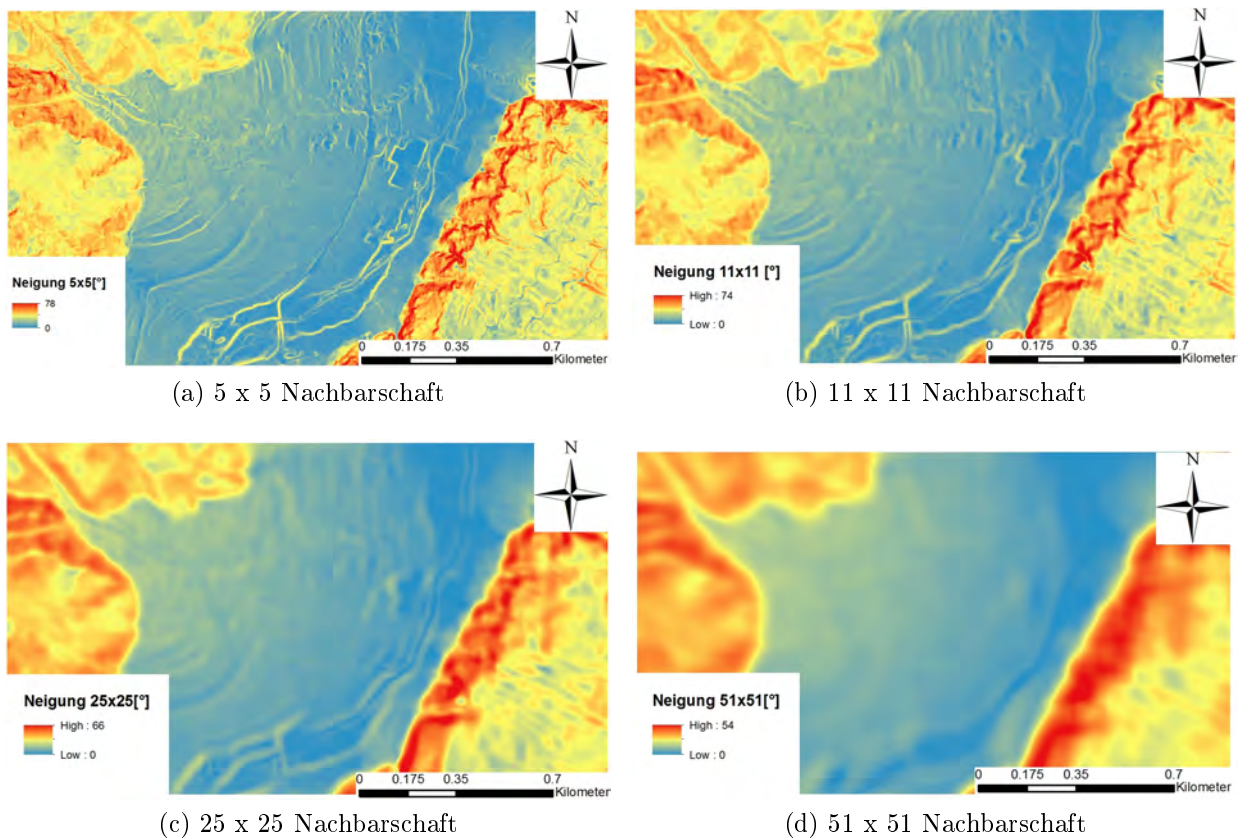


Abbildung 4.7: Neigungsunterschiede durch Verwendung verschiedener Nachbarschaftsgrößen. Verwendete Daten: swissALTI3D von swisstopo.

schiede zu b) sind klein und vor allem an der Glättung sehr rauher Oberflächen (östlich des Murkegels) und an scharfen Grenzen (beispielsweise bei der Uferböschung des Flusses) zu erkennen. Die starke Glättung in c) und d) ist klar ersichtlich. Die Kegeloberfläche erscheint in diesen beiden Abbildungen sehr viel homogener als bei den anderen Abbildungen. Abbildung d) zeigt aber auch, dass die Oberfläche so stark geglättet wird, dass der Flusslauf mitsamt Uferböschung im Norden nicht mehr erkennbar ist. Dieser stellt aber unter Umständen eine natürliche Begrenzung des Kegelfusses dar, weshalb er noch erkennbar sein sollte. Des Weiteren beträgt die Maximalneigung in d) noch 54 Grad, eine Abnahme von über 20 Grad gegenüber a). Gut möglich also, dass in d) die Neigung eher unter- und in a) überschätzt wird. Aufgrund dieser Punkte fiel die Entscheidung auf die Verwendung einer Nachbarschaftsgröße für das gleitende Fenster von 25 x 25 Pixel.

Für das DHM25 wurde die übliche Nachbarschaft von 3 x 3 Pixeln verwendet, da dessen Zellenauflösung einiges grober ist als die des swissALTI3D.

Neigungswerte, Neigungsgrenzen

Nach der Definition der Nachbarschaft für das gleitende Fenster konnten die Neigungsgrenzen für die Murkegel festgelegt werden. Die Neigungsgrenzen definieren Grenzwerte, für welche der *Region-growing* Algorithmus nach Murkegel-Pixeln sucht. Diese Grenzwerte müssen nach der Auswahl der Nachbarschaftsgrösse festgelegt werden, da die Neigung mit zunehmender Nachbarschaftsgrösse abnimmt (siehe Abb. 4.7), was eine Verschiebung der Neigungsgrenzen zur Folge hat. Die meisten im Abschnitt 2.1 erwähnten Quellen beschreiben eine Gesamtneigung des Kegels, welche nicht vergleichbar ist mit der lokal berechneten Neigung. Eine Ausnahme in der Literatur bildet die Arbeit von STALEY ET AL. (2006). In ihrer Arbeit haben die Autoren Murkegel in zehn Zonen entlang ihres Längenprofils geteilt und jeweils für die verschiedenen Zonen die Neigung und Kurvatur gerechnet. Für die oberste Zone am Kegelhals resultierte eine mittlere Neigung von 25 Grad, während für die unterste Zone am Fusse des Kegels eine mittlere Neigung von fünf Grad resultierte. Diese Werte bildeten den Ansatz für die Festlegung der Neigungsgrenzwerte. Zusätzlich wurden für die Festlegung der Grenzwerte mittels der neun digitalisierten Testkegel im Val Müstair zonale Statistiken für die Neigung erstellt. In den Boxplots der Abbildung 4.8 wird die Neigungsverteilung der einzelnen Kegel dargestellt. Die *Whiskers* stellen die 1.5-fache Interquartilspannweite (IQR für *Inter-quartile range*) über dem 3. beziehungsweise unter dem 1. Quartil, wobei die Interquartilspannweite *IQR* definiert ist als $(75\%Quantil - 25\%Quantil)$. Die darüber und darunterliegenden Werte stellen die Ausreisser dar. Der untere *Whisker* der meisten Kegelneigungen liegt in etwa um drei bis sechs Grad, wobei einige Ausreisser eine geringere Neigung aufweisen. Eine Ausnahme bilden die Kegel bei Müstair und Fuldera. Deren untere Neigungsgrenze liegt bei 0.5 respektive einem Grad. Beim Kegel von Fuldera handelt es sich um einen extrem flachen Kegel, während der Kegel von Müstair der grösste im Val Müstair ist und deshalb auch die grösste Wertespannweite aufweist. Alle seine Neigungswerte liegen über dem Bereich der 1.5-fachen IQR unter dem 1. Quartil. Der obere *Whisker* pendelt sich etwa bei 12 -20 Grad ein. Dieser Wert liegt etwas tiefer als der von STALEY ET AL. (2006) beobachteten Wert für die Kegelhalsneigungen. Allerdings ist auch klar ersichtlich, dass relativ viele Ausreisser bestehen, welche Neigungen bis zu 30 Grad aufweisen. Die

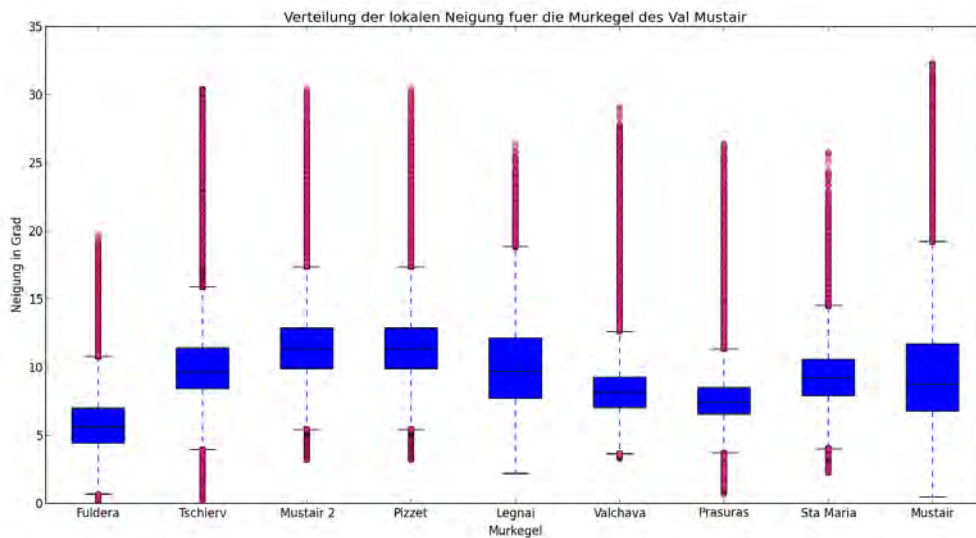


Abbildung 4.8: Neigungsverteilungen der Test-Murkegel des Val Müstair.

Neigungsmediane der Kegel variieren zwischen 6 und 12 Grad. Die Neigungsverteilungen dieser Kegel sind mit Vorsicht zu geniessen, da sie stark von der Kartierung der Testkegel abhängig sind, welche ja einer gewissen Subjektivität unterliegt. Kartierte man beispielsweise die Kegel etwas grosszügiger, könnten sich die Werte für die *Whiskers* durchaus nach unten respektive oben verschieben. Da es sich bei den Kegeln im Val Müstair um eher flache Kegel handelt und die Stichprobengrösse mit neun Kegeln eher bescheiden ist, wurden die Neigungsgrenzwerte für das Ähnlichkeitskriterium gemäss STALEY ET AL. (2006) übernommen (5-25 Grad), zumal die beobachteten Neigungen im Val Mustair nicht stark davon abweichen, auch wenn sie eine Tendenz zu niedrigeren Kegelneigungen aufweisen. Für die Generierung der Seedpixel wurden alle Gebiete mit einer Neigung von 5-10 Grad in Betracht gezogen. Dieser Wert wurde so gewählt, damit die Seedpixel am Kegelfuss zu liegen kommen, da hier der Kegel durch die Kombination von Neigung und Plankurvatur der Gerinnefläche⁷ am besten von der umgebenden Landschaft zu unterscheiden ist. Für die Klassierung mittels DHM25 wurden die gleichen Neigungsgrenzen verwendet.

⁷Plankurvatur der Gerinnefläche wird in Abschnitt 4.6.3 genauer beschreiben

Ähnlichkeitskriterium

Das Ähnlichkeitskriterium für die *Region-growing*-Prozedur wurde durch das Verhältnis der Neigung des aktuellen Pixels zum Nachbarpixel definiert. Dabei wurde immer der kleinere Neigungswert durch den grösseren Neigungswert geteilt. Diese Definition gründet in der Überlegung, dass abrupte, starke Neigungsänderungen Hinweis für die Kegelgrenze sind, da die Kegeloberfläche einen kontinuierlichen Neigungsverlauf zeigt. Aufgrund der unterschiedlichen Auflösung wurden für das swissALTI3D und das DHM25 zwei verschiedene Grenzwerte für die Ähnlichkeit gesetzt. Die Werte selber wurden durch wiederholte Klassierungsversuche der Testkegel im Val Müstair ermittelt. Für das swissALTI3D galt, dass ein Pixel als Murkegelpixel in Betracht gezogen wurde, falls das Neigungsverhältnis > 0.985 war. Ein Grenzwert von 0.85 wurde für die Klassierung mittels DHM25 verwendet.

4.6.3 Plankurvatur

Die Plankurvatur bildete die zweite Komponente in der Auswahl der Seedpixel. Sie wird in der Geomorphometrie dazu benutzt, divergentes von konvergentem Fliessverhalten zu unterscheiden (OLAYA, 2009). Sie beschreibt die Konvexität oder Konkavität einer Oberfläche in der horizontalen Ebene (XY-Ebene). Ein V-Tal beispielsweise ist im Querschnitt ausgesprochen konkav wodurch auch der Abfluss konvergent ist. Dieses Phänomen kann gut durch die Plankurvatur beschrieben werden, während die Profilkurvatur im Gegensatz dazu eine Zu- oder Abnahme des Gefälles beschreibt (MACMILLAN & SHARY, 2009).

Berechnung

Bei der Plankurvatur handelt es sich um die zweite Ableitung einer Oberfläche an einem bestimmten Punkt der Oberfläche. Angewendet auf die in 4.6.1 modellierte Oberfläche kann man die Plankurvatur gemäss WOOD (1996) nach folgender Formel berechnet werden:

$$Plankurvatur = \frac{200(bd^2 + ae^2 - cde)}{(e^2 + d^2)^{1.5}} \quad (4.11)$$

Falls die Neigung (Komponente im Divisor) = 0 ist, gibt es keine Plankurvaturkomponente. Nach dem gleichen Muster wie bei der Neigungsimplementierung wurde die Plankurvatur ebenfalls mit der Oberflächenmodellierung in einer Funktion (*ncn_curvature*) zusammengefasst. Wieder wurde ein Kurvatur-Array initialisiert und die durch die Ober-

flächenmodellierung erhaltenen Konstanten in Gleichung 4.11 eingegeben. Die resultierenden Werte wurden jeweils in das Krümmung-Array eingefügt und dieses dann als .txt-File abgespeichert.

Auswahl der Nachbarschaft

Die Verwendung der Plankrümmung diene in dieser Arbeit genau genommen nicht zur Beschreibung der Konvexität des ganzen Murkegels. Vielmehr sollte mit Hilfe einer geglätteten Krümmung zwischen Gerinnen innerhalb konkaver und solchen auf konvexer Oberfläche unterschieden werden. Die folgenden Überlegungen sollen dies veranschaulichen. Die Neigung und das Vorkommen eines Gerinnes bilden zwar zwei Voraussetzungen für die Bildung eines Murkegels. Jedoch reichen diese zwei Merkmale zur Diskriminierung der Kegel nicht aus, da beispielsweise Hängetäler die selben Eigenschaften aufweisen. Die Konvexität des Murkegels als Form bildet ein markantes Unterscheidungsmerkmal zu anderen *land forms*. Aufgrund der variablen Grösse der einzelnen Murkegel müsste man aber die Glättung der Krümmung durch die Wahl unterschiedlicher Nachbarschaftsgrößen jeweils der Kegelbreite anpassen, damit die Konvexität des Kegels erkannt wird. Es wird klar, dass dieser Vorgang nicht mit einer automatischen Extraktion vereinbar wäre. Durchaus möglich ist es aber, die Oberflächenform, auf welcher sich das Gerinne befindet, mittels geglätteter Krümmung zu beschreiben. Da das Gerinne, welches durch die Abflussakkumulation immer in etwa gleich breit ist, genügt es, einmal eine genug grosse Nachbarschaft für die Berechnung der Krümmung zu definieren. Diese bleibt dann konstant. Wichtig ist, dass die Nachbarschaft genug gross gewählt wird, damit sie die konvexe Form, auf welcher das Gerinne verläuft, beschreiben kann. Bei Benützung des swissALTI3D als Datengrundlage wird klar, dass eine 3 x 3 Nachbarschaft nicht ausreicht um die Konvexität zu beschreiben, da nur die nächsten 6 x 6 Meter der Topographie hinzugezogen würden, um die Plankrümmung zu berechnen. Die folgende Abbildung 4.9 soll dies verdeutlichen. Sie zeigt eine schematische Darstellung der Querschnitte eines Flussbetts in einem V-Tal und ein eingetieftes Gerinne auf einem Murkegel. Die schwarzen Balken repräsentieren die Zellen des swissALTI3D. Ihre horizontale Auflösung beträgt zwei Meter. Die grüne Linie stellt den tatsächlichen Geländeverlauf dar. Die rote Zelle stellt die Zentralzelle dar, für welche mittels Nachbarschaft der Krümmungswert ermittelt wird. Die rote Linie stellt die modellierte Oberfläche dar. Es ist im Bild ersichtlich, dass bei Verwendung einer zu kleinen Nachbarschaft die modellierte Oberfläche des V-Tals der des Murkegels ähnelt und somit

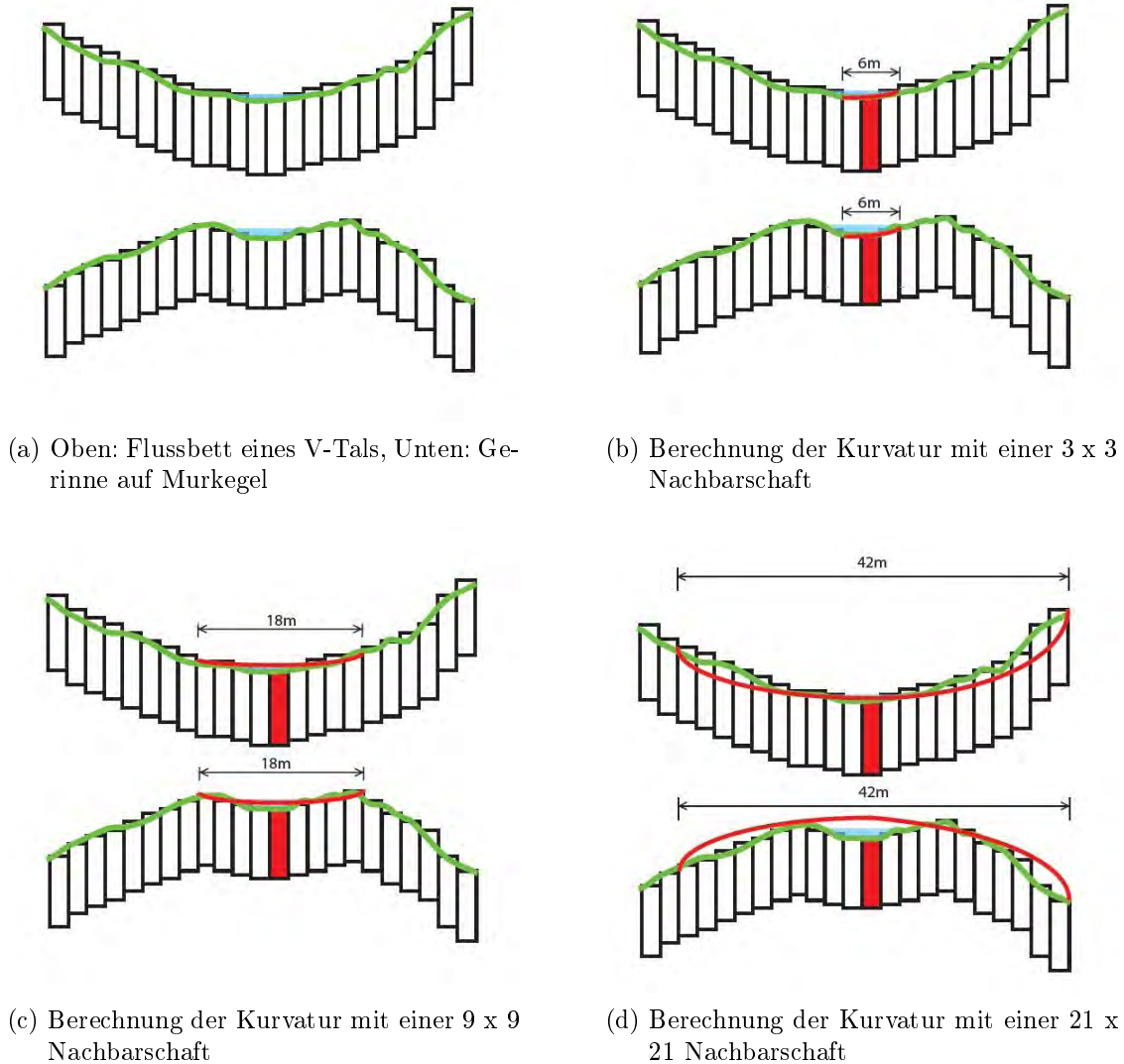


Abbildung 4.9: Einfluss der Nachbarschaftsgröße auf die Krümmungswerte.

auch ähnliche Krümmungswerte für die Zentralzelle resultieren. Selbst wenn man die Nachbarschaft auf 9 x 9 Zellen vergrößert, sind noch immer beide Oberflächen konkav. Erst bei einer Nachbarschaft von 21 x 21 Zellen lässt sich anhand der Krümmung ein Gerinne in einem V-Tal von einem Gerinne eines Murkegels unterscheiden. An dieser Stelle sei angemerkt, dass die Oberflächenmodellierung nur schematisch dargestellt ist und keine Oberfläche gerechnet wurde. Es ist aber durchaus realistisch, dass die Oberfläche nicht

durch die Zentralzelle laufen muss, da diese Einschränkung in der Oberflächenmodellierung nicht gegeben ist.

Für die Murkegel des Val Müstair hat sich gezeigt, dass in Verwendung des swissALTI3D eine Nachbarschaft von 51 x 51 Zellen (102 x 102 Meter) gut zwischen konkaven Gerinnen wie denjenigen in V- oder Haupttälern und denjenigen auf den Murkegeln zu unterscheiden vermag. In die Untersuchung flossen die selben Nachbarschaftsgrößen ein, welche auch für die Ermittlung der Neigungs-Nachbarschaft verwendet wurden (siehe 4.6.2). Für die Klassierung mit dem DHM25 war die 3 x 3 Nachbarschaft (75 x 75 Meter) nicht geeignet, um zwischen den beiden Oberflächenformen zu unterscheiden. Deshalb wurde eine 5 x 5 Nachbarschaft verwendet.

Grenzwerte

Positive Krümmungswerte bedeuten für die in dieser Arbeit verwendete Oberflächenmodellierung in der horizontalen Ebene konvexe Formen, also divergenten Abfluss. Negative Werte stehen für einen konvergenten Abfluss und eine konkave Form in der XY-Ebene. Demzufolge erschien es sinnvoll, Krümmungswerte ≥ 0 für den unteren Grenzwert zu verwenden. Für den oberen Grenzwert wurde die Verteilung der Krümmungswerte analog zur Untersuchung der Neigungswerte in Abschnitt 4.6.2 untersucht, ausser, dass die Krümmungswerte des ganzen Tals und nicht nur der Referenzkegel verwendet wurden. Die Obergrenze K_o wurde definiert durch:

$$K_o \leq Q_3 + 1.5 \cdot IQR \quad (4.12)$$

wobei Q_3 das 3. Quartil ist. So wurde sichergestellt, dass keine Ausreisser in die Klassifikation mit einbezogen wurden. Der obere und untere Grenzwert für die Krümmung wurden sowohl für das swissALTI3D als auch für das DHM25 gleich berechnet. Für die Krümmung mit einer Nachbarschaft von 51 x 51 Zellen liegt dieses im Val Müstair bei 1.87.

4.6.4 Abflussakkumulation

In der vorliegenden Arbeit bildete die Abflussakkumulation die Basis für die Ableitung eines Flussnetzwerks. Dieses wiederum bildete den letzten Input für die Generierung der Seedpixel. Da es sich beim Flussnetzwerk im Gegensatz zur Neigung und Krümmung um eine lineare Form handelt, ist ihr Einfluss auf die räumliche Verbreitung der Seedpixel am stärksten. Am Anfang der Abflussakkumulation erhält jede Zelle eines DHM eine «Ab-

flusseinheit». Diese fliesst in die benachbarten, tieferliegenden Zellen. Je tiefer die Zelle liegt, desto mehr Abfluss von anderen Zellen akkumuliert sich in ihr. Der Abfluss kann sich je nach Gewichtung unter den Zellen aufteilen oder vollständig zur tiefstgelegenen Zelle der direkt benachbarten 8 Zellen fließen (GRUBER & PECKHAM, 2009), je nachdem welche Methode zur Definition der Flussrichtung (*flow direction*) verwendet wird. Zur Berechnung der Abflussakkumulation wurde die in ArcGIS implementierte Methode von TARBOTON ET AL. (1991) verwendet. Die sogenannte D8-Methode definiert die Flussrichtung des Abflusses über den grössten Höhenunterschied zwischen der Zentralzelle und den 8 umgebenden Nachbarn. Dabei fliesst der gesamte Abfluss in die tiefste Nachbarzelle. Dadurch wird der Abfluss auf 8 mögliche Richtungen beschränkt. Diese Einschränkung und die Eigenschaft, dass der gesamte Abfluss in eine Zelle fliesst und somit keine Aufteilung des Abflusses ermöglicht, stellen die grössten Schwächen dieser Methode dar. Andererseits ist sie sehr effizient und die Implementierung in ArcGIS führt dazu, dass sie oft verwendet und verglichen wird.

Grenzwertbestimmung und Generierung des Flussnetzwerks

Für die Berechnung der Abflussrichtungen und der Abflussakkumulation mussten zuerst die Senken des DHM entfernt werden, damit ein kontinuierlicher Abfluss gewährleistet ist. Dazu wurde das *fill*-Tool in ArcGIS verwendet. Danach konnte die Abflussrichtung mit dem *flow-direction*-Tool für alle Zellen des DHM ermittelt werden und daraus mittels *flow-accumulation*-Tool die Abflussakkumulation ermittelt werden. Um daraus ein Abflussnetzwerk zu generieren, musste ein Grenzwert gefunden werden, unter welchem der akkumulierte Abfluss einer Zelle nicht als Teil eines Gerinnes galt. Diese Auswahl eines geeigneten Grenzwerts ist entscheidend um ein realistisches Flussnetzwerk generieren zu können. Wählt man den Grenzwert zu tief, werden Flüsse modelliert, welche in der Realität nicht vorhanden sind. Wählt man den Grenzwert zu hoch, läuft man Gefahr, dass gewisse Gerinne nicht modelliert werden. Die Auswahl des Grenzwerts wird dadurch erschwert, dass sich die Werte der Abflussakkumulation pro Zelle je nach Grösse des DHM, des gewählten Ausschnitts und der Zellengrösse stark variieren können. Um eine realistische Abflussakkumulation für ein vordefiniertes Gebiet wie das Val Müstair zu erhalten, muss ein Gebiet für die Abflussmodellierung gewählt werden, welches etwas grösser ist als das Untersuchungsgebiet., damit auch am Rande des Untersuchungsgebiets realistische Abflüsse modelliert werden. Zur Definition eines unteren Grenzwerts der

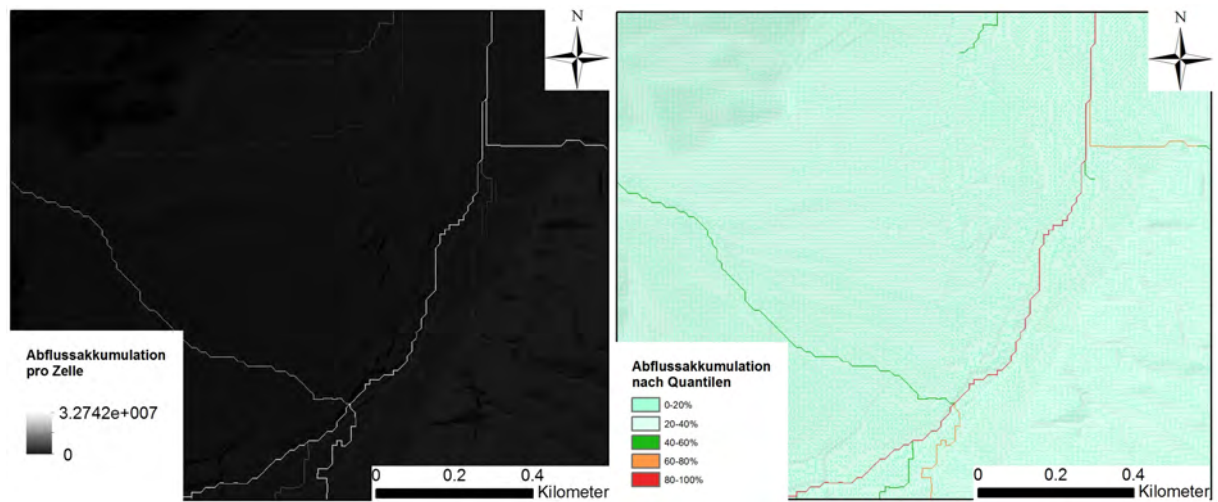
zwischen Gerinne / nicht Gerinne unterscheidet wurde die jeweilige Werteverteilung betrachtet. Eine gute und relativ stabile Methode für Täler der Grösse des Val Müstair, des Mattertal oder Goms und der Verwendung des swissALTI3D bildete die Klassierung der Abflussakkumulations-Werte nach Quantilen. Der Grenzwert wurde dem 40%-Quantil gleichgesetzt. Allen Zellen welche einen Wert unterhalb des Grenzwerts aufwiesen, wurde neu der Wert NoDATA übergeben, allen darüber der Wert 1. Dadurch entstand ein Flussnetzwerk. Abbildung 4.10 zeigt in a) die Abflussakkumulation eines Abschnitts des Val Müstair vor der Klassierung, in b) die Klassierung mittels Quantilen und 5 Klassen und in c) das resultierende Flussnetzwerk. Aufgrund der grösseren Zellenauflösung und der daraus resultierenden geringeren Abflussakkumulation ist die Klassifikation nach Quantilen mit 5 Klassen hier zu grob. Eine bessere Alternative bot die Klassierung *standard deviations* mit der Parameterwahl $\frac{1}{3} stdev$. Durch das Ausschalten der untersten Klasse mittels NoData-Zuweisung wurde auf den ersten Blick eine gute Modellierung für das Mattertal und das Goms erreicht.

Überprüfung der Abflussakkumulation

Ein sehr wichtiger Schritt in der Flussnetzwerks-Modellierung ist die Überprüfung ihrer Güte. Eine einfache Möglichkeit besteht in der visuellen Überprüfung mit Hilfe einer Referenzkarte, wie beispielsweise der Pixelkarte PK25 von swisstopo. Grundsätzlich empfiehlt sich auch eine quantitative Überprüfung der Güte um verschiedene Modellierungen miteinander vergleichen zu können. Eine gute Möglichkeit dazu wird durch YANG ET AL. (2014) beschrieben. Die Autoren verwenden den *Longitudinal Root Mean Square Error LRMSE*, die Wurzel der mittleren quadratischen Abweichung des Flussnetzwerks zur Referenz. Zur Berechnung teilen sie das Flussnetzwerk in m gleichmässige Segmente, getrennt durch $n = m + 1$ Punkte. Für jeden Punkt wird dessen Distanz d zum nächsten Punkt auf der Referenz berechnet:

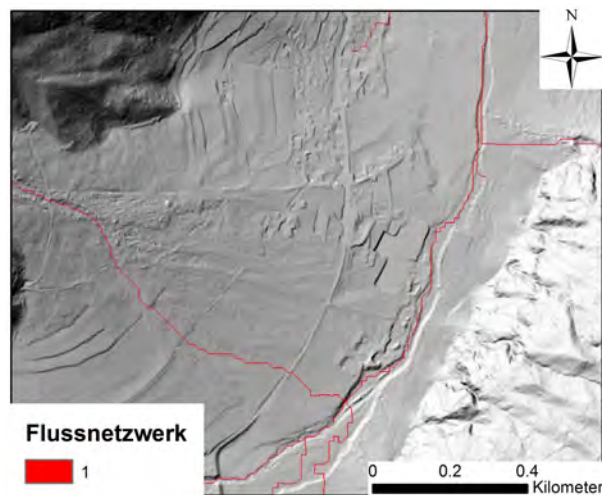
$$LRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d^2}{n}} \quad (4.13)$$

Mit 4.13 lässt sich die Abweichung des modellierten Flussnetzwerks zum reellen Flussnetzwerk quantitativ ausdrücken. Je kleiner der *LRMSE*, desto besser die Güte der Modellierung. Weist das modellierte Flussnetzwerk beispielsweise einen Flusszweig auf, der in der Realität nicht existiert, so wird der Wert des *LRMSE* steigen, da es in der



(a) Ergebnis der Abflussakkumulation

(b) Abflussakkumulation klassiert nach Quantilen und 5 Klassen



(c) Flussnetzwerk

Abbildung 4.10: Erstellung eines Flussnetzwerks mittels Klassifikation einer Abflussakkumulation. Verwendete Daten: Hillshade swissALTI3D von swisstopo.

Nähe keinen entsprechenden reellen Flusszweig gibt. Durch den *LRMSE* lassen sich die falsch-positiven Fälle quantifizieren. YANG ET AL. (2014) erwähnen aber keine Lösung zur Quantifizierung der falsch-negativen Fälle, also beispielsweise wenn ein Flusszweig nicht durch die Modellierung erzeugt wird, dieser aber in Realität existiert. Dies lässt sich jedoch relativ leicht bewerkstelligen. Statt die Modellierung in gleichmässige Segmente

aufzuteilen, kann man dies mit der Referenz tun. Indem man die Referenz in s Segmente, getrennt durch p Punkte, aufteilt (wobei wieder gilt, dass $p = s + 1$), lässt sich die Distanz d_{ref} der Punkte auf der Referenz zur Modellierung bestimmen. Dieses neue Mass der Güte wurde $LRMSE_{ref}$ genannt, in Anlehnung an die Tatsache, dass nun die Referenz gegen die Modellierung getestet wird.

$$LRMSE_{ref} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^p d_{ref}^2}{p}} \quad (4.14)$$

Auf den ersten Blick scheint es keinen Unterschied zwischen 4.13 und 4.14 zu geben, führt man sich aber folgendes Beispiel vor Augen, so wird die Notwendigkeit des $LRMSE_{ref}$ klar. Ein Flussnetzwerk modelliert zwei Seitenäste. Einer davon (1) existiert tatsächlich, der andere (2) ist in Wahrheit nicht vorhanden. Zusätzlich wird ein dritter Seitenast (3) von der Modellierung unterdrückt. Für (1) werden der $LRMSE$ und der $LRMSE_{ref}$ den gleichen Wert aufweisen. Für (2) wird der $LRMSE$ stark ansteigen, da der Seitenast durch die Punkte erfasst wird und somit eine Distanz gerechnet werden kann. Der $LRMSE_{ref}$ hingegen wird keine Abweichung anzeigen, da dessen Punkte auf dem Hauptast liegen und die Distanz zum Hauptast der Referenz gemessen werden, nicht aber zum fälschlich modellierten Seitenast. Umgekehrt verhält es sich mit (3). Der $LRMSE$ wird keine Abweichung detektieren, da der Ast gar nicht modelliert wurde und die Distanz somit nur zum Hauptfluss gemessen wird. Der $LRMSE_{ref}$ hingegen wird die Abweichung erfassen, da von (3), wo die Punkte liegen, zum nächsten Punkt der Modellierung gemessen wird. Um die beiden Gütemasse zu berechnen, mussten zuerst einige Schritte in ArcGIS durchgeführt werden. Das Flussnetzwerk wurde mittels des Werkzeugs *polyline* vom Raster ins Vektorformat konvertiert. Als Fließgewässer-Referenz wurden die swisstlm3D-Vektordaten von swisstopo verwendet. Für die Segmente der beiden Flussnetzwerke wurden Punkte in einem Abstand von jeweils 20 Metern zueinander generiert. Dies geschah im *edit-tool* mit dem Befehl *edit points*. Die Distanzen d und d_{ref} wurden mittels *near-tool* ermittelt. Dabei wurde immer darauf geachtet, dass die beiden Flussnetzwerke in etwa die gleiche Ausdehnung hatten.

Entfernung des Hauptflusses

Als letzter Schritt wurde die ArcGIS-Funktion *stream order* mit der Option *STRAHLER* verwendet, um den Hauptfluss des Tals zu entfernen. Diese Funktion weist jedem Flusssegment einen Wert zu. Die äussersten Segmente erhalten immer den Wert 1. Treffen zwei Segmente mit der gleichen Nummer aufeinander, so erhält das anschliessende Segment eine um 1 höhere Nummer⁸. Auf diese Art erhält der Hauptfluss des betrachteten DHM-Ausschnitts die höchste Ordnung. Der Hauptfluss wurde aus dem Flussnetzwerk extrahiert, indem die Ordnung des Hauptflusses (im Fall des Val Müstair war dies Ordnung 5) als NoData und alle anderen Segmente als 1 klassiert wurden.

4.6.5 Rauigkeitsindex

Der Rauigkeitsindex wurde gewählt, da CAVALLI & MARCHI (2008) ihn erfolgreich verwendet haben, um typische Murgangablagerungen zu detektieren. Einen hohen Rauigkeitswert konnten die Autoren mit diesen Ablagerungen in Verbindung bringen, während tiefe Rauigkeitswerte auf ihrem Testmurkegel als fluviale Ablagerungen oder für die Landwirtschaft künstlich geglättete Oberflächen interpretiert wurden. Der Rauigkeitsindex wurde nicht zur Generierung der Seedpixel verwendet, sondern um später fälschlicherweise als Murkegel klassierte Flächen von richtig klassierten Murkegeln anhand der Rauigkeitswerte zu unterscheiden. BERTI ET AL. (2013) haben verschiedene Rauigkeitsindizes auf ihre Leistung in der Unterscheidung von nicht gefährdeten Hängen, aktiven und inaktiven Rutschhängen untersucht. Dabei haben sie gezeigt, dass alle Rauigkeitsindizes bei der generellen Unterscheidung von verschiedenen Landformen in etwa gleich gut abschneiden und dass simple Methoden wie die Standardabweichung der Höhendifferenz sogar effektiver sein können als komplexere Methoden. Eine solche «simple» Methode wurde von CAVALLI & MARCHI (2008) beschrieben und in dieser Arbeit verwendet. Dieser Rauigkeitsindex ist definiert als Standardabweichung der «residuellen Topographie». Abbildung 4.11 beschreibt den Vorgang der Berechnung. Zuerst wird die Differenz eines mittels gleitendem Durchschnitt geglätteten LiDAR-DHM zum ursprünglichen DHM gerechnet. Dadurch erhält man, was CAVALLI & MARCHI (2008) *residual topography* nennen. Durch diesen Schritt wird der Einfluss der Neigung auf die Oberflächenrauigkeit minimiert. Von dieser residuellen Topographie kann man nun erneut zellenweise (also gleitend) den Durchschnitt berechnen,

⁸Eine ausführliche Erklärung der Funktionsweise liefert die ArcGIS Hilfe

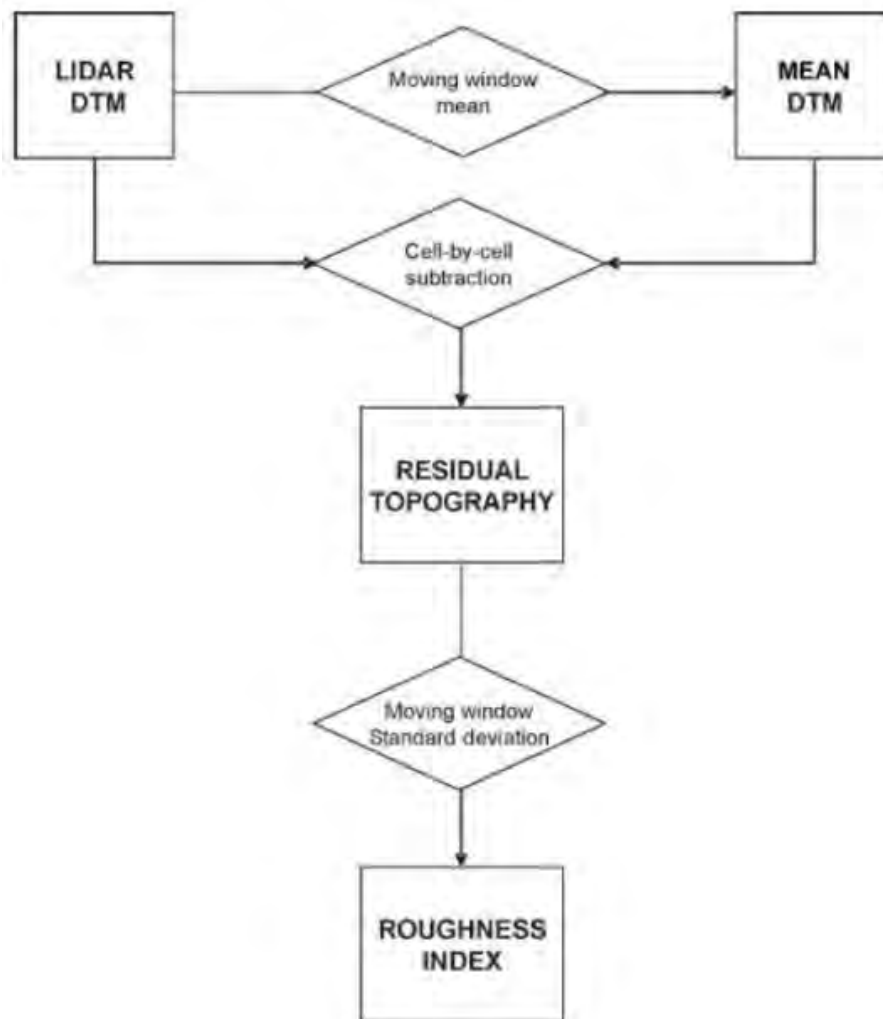


Abbildung 4.11: Verfahren zur Berechnung des Rauigkeitsindex. Aus (CAVALLI & MARCHI, 2008).

wieder die Differenz bilden und davon die Standardabweichung berechnen. Der resultierende Rauigkeitsindex ist eine masslose Grösse, welche die lokale Variation der Topographie widerspiegelt. Der mathematische Ausdruck ist in der Formel 4.15 ersichtlich:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{25} (x_i - x_m)^2}{25}} \quad (4.15)$$

wobei 25 die Anzahl Zellen der verwendeten Nachbarschaftsgrösse 5 x 5 für die Berechnung der gleitenden Standardabweichung x_i entspricht dem jeweiligen Wert der residuellen Topographie für die Zelle i und x_m entspricht dem geglätteten Wert der residuellen Topographie.

4.7 Implementierung des *Region-growing* Algorithmus

4.7.1 Generierung der Seedpixel

Die Generierung der Seedpixel erfolgte durch die Verschneidung des Neigungs-, Plankurvatur- und Flussnetzwerkrasters. Zuerst wurden die Neigungs- und Plankurvaturwerte neu klassiert, so dass die Raster nur noch die Werte 1 für Seedpixel und NoDATA für die restliche Region erhielten. Für das Neigungsraster bedeutet dies, dass alle Zellen mit Neigungswerten zwischen fünf und zehn Grad den Wert 1 erhielten. Entsprechend wurde sämtlichen Plankurvaturwerten zwischen 0 und 1,87 4.6.3 den Wert 1 zugewiesen. Durch Multiplikation der drei Raster resultierte ein Seedpixel-Raster mit Werten 1 für jedes Pixel, welches die Neigungs-, Plankurvatur- und das Flussnetzwerkriterien erfüllte. Pixel, die keines, nur eines oder zwei Kriterien erfüllten, erhielten den Wert NoDATA. Das Raster diente als Input für den *region-growing* Algorithmus.

4.7.2 *Region-growing*

Der Prozess des in dieser Arbeit verwendeten *region-growing* Algorithmus wird im Flussdiagramm 4.12 dargestellt. Der erste Schritt besteht in der Konversion des Rasters in ein Python-Array. Dies wurde mit der Funktion *txt_to_numpy_array* (siehe auch Abschnitt 4.4) durchgeführt. Die Implementierung des *region-growing* Algorithmus wurde in zwei Funktionen aufgeteilt: *seedlist_start* und *seedlist_expand*. In der Funktion *seedlist_start* wurden die Koordinaten jener Zellen in eine Liste gespeichert, welche nicht 0 oder -9999 (NoDATA) als Wert enthalten:

```
1 def seedlist_start(Seedraster):
2     fuer (x=1;x<Laenge(Seedraster);x+=1):
3         fuer (y=1;y<Breite(Seedraster);y+=1):
4             falls Seedraster[x,y] != 0 und Seedraster[x,y] != -9999
5                 fuege (x,y) der Seedliste hinzu;
```

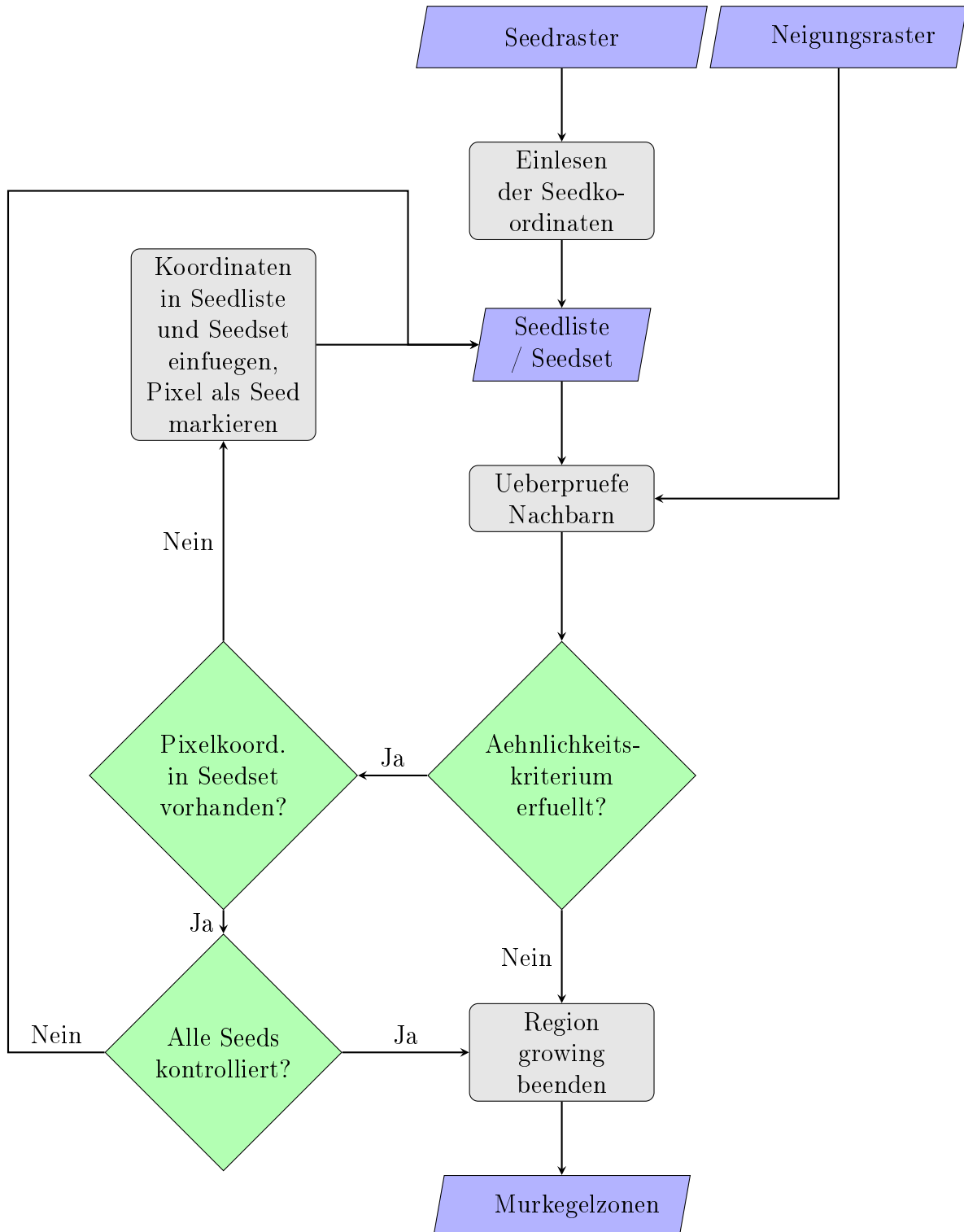


Abbildung 4.12: Ablauf des *Region-growing*.

```
6     fuege (x,y) dem Seedset hinzu;  
7     uebergib Seedliste , Seedset
```

Es wurden sowohl eine Liste als auch ein Set mit den Koordinaten gespeichert. Eine python-Liste hat den Vorteil, dass man sehr schnell durch sie iterieren kann. Das Set hat den Vorteil, dass die Suche nach einem Element viel effizienter ist, als wenn man eine Liste verwendet. Set und Liste wurden dann der Funktion *seedlist_expand* übergeben. Weitere Inputs waren das Seedraster und das Neigungsraster, welches für das Ähnlichkeitskriterium verwendet wurde. Zu Anfang der Funktion wurde überprüft, ob das Neigungs- und das Seedraster die gleiche Dimension haben (Zeile 2), da dies Voraussetzung für die erfolgreiche Extraktion von Neigungswerten anhand von Seedraster-Koordinaten ist. Dann wurde durch die Seedliste iteriert und für jede Seedpixel-Koordinate wurden die Koordinaten der umliegenden Nachbarn in ein temporäres, strukturiertes Array *Nachbarn* gespeichert (Zeilen 4-20). Normalerweise enthielt dieses Array die 8 umliegenden Nachbarn, für Seedpixel in Randregionen waren es weniger, mindestens aber immer deren drei. Für jeden Kandidaten in *Nachbarn* wurde die Ähnlichkeit zum Seedpixel untersucht und ob er sich innerhalb der Neigungsgrenzen befindet. Zur Erinnerung: das Ähnlichkeitskriterium und die Neigungsgrenzen wurden folgendermassen definiert:

- Ähnlichkeitskriterium swissALTI3D: *Neigungverhaeltnis* > 0.985
- Ähnlichkeitskriterium DHM25: *Neigungverhaeltnis* > 0.85
- Neigungsgrenzen (gleich für beide DHM): 5 – 25 Grad

Zur Überprüfung wurden mittels Koordinaten des Kandidaten die Neigungswerte aus dem Neigungsraster extrahiert (Zeilen 22 -31). Falls der Kandidat die Kriterien erfüllte, wurde untersucht, ob sich dessen Koordinaten schon in der Seedliste befanden (Zeile 32). War dies nicht der Fall, wurden die Koordinaten in die Seedliste eingefügt (Zeilen 33 & 34). Im Seedraster wurde der Wert mit den entsprechenden Koordinaten des Kandidaten = 1 (oder dem entsprechenden Seedwert) gesetzt und somit ebenfalls als Seed markiert (Zeile 35). Waren seine Koordinaten in der Seedliste vorhanden, wurde direkt der nächste Kandidat getestet (Zeile 22 ff.). Waren alle Kandidaten vorhanden, wurde keine neuen Koordinaten in die Seedliste eingeführt und der Algorithmus sprang direkt zum nächsten Eintrag der Seedliste, um dessen Nachbarn auf Ähnlichkeit zu testen (Zeile 4 ff.). Erfüllte keiner der Kandidaten die Kriterien wurde der Algorithmus beendet.

```

1 def seedlist_expand(Seedliste, Seedset, Neigungsraaster, Seedraaster):
2     falls Laenge(Seedraaster) == Laenge(Neigungsraaster) UND
3     Breite(Seedraaster) == Breite(Neigungsraaster)
4     fuer Eintrag in Seedliste:
5         x_coord = Eintrag[0]
6         y_coord = Eintrag[1]
7         count = -1 # Zaehler fuer die Kandidaten, die den Auswahlkriterien
            entsprechen.
8     ### Nachbarn definieren und in Liste abspeichern
9     # 8 Nachbarn
10    falls Seedpixel nicht in Randregion von Seedraaster:
11        Nachbarn = [(Neigungsraaster[x-Koord_Nachbar 0, y-Koord_Nachbar
12                    0], Koord_Nachbar 0) ... ,
13                    (Neigungsraaster[x-Koord_Nachbar 7, y-Koord_Nachbar
14                    7], Koord_Nachbar 7)}
15    # 3 Nachbarn
16    falls Seedpixel in Rasterecke:
17        Nachbarn = [(Neigungsraaster[x-Koord_Nachbar 0, y-Koord_Nachbar
18                    0], Koord_Nachbar 0) ... ,
19                    (Neigungsraaster[x-Koord_Nachbar 2, y-Koord_Nachbar
20                    2], Koord_Nachbar 2)}
21    # 4 Nachbarn
22    falls Seedpixel am Rasterrand:
23        Nachbarn = [(Neigungsraaster[x-Koord_Nachbar 0, y-Koord_Nachbar
24                    0], Koord_Nachbar 0) ... ,
25                    (Neigungsraaster[x-Koord_Nachbar 3, y-Koord_Nachbar
26                    3], Koord_Nachbar 3)}
27    ### Ueberpruefung auf Aehnlichkeitskriterien
28    fuer Kandidaten in Nachbarn[0]:
29        count +=1
30        falls Neigung Kandidat > Neigung aktuelles Pixel:
31            Neignungsverhaeltnis = Pixel / Kandidat
32        ansonsten:
33            Neignungsverhaeltnis = Kandidat / Pixel
34        falls Neigung Kandidaten >= 5 UND Neigung Kandidaten <= 25
35        UND Neignungsverhaeltnis > 0.985 #swissALTI3D-Fall
36            p = count #Position des Kandidaten im strukturierten Array
37            Nachbarn
38            Neue_Koordinaten = Nachbarn[p]

```

```
32     falls Neue_Koordinaten NICHT in Seedset :
33         Neue_Koordinaten Seedset hinzufuegen
34         Neue_Koordinaten Seedliste hinzufuegen
35         Seedarray[Neue_Koordinaten_x][Neue_Koordinaten_y] = 1
36     Speichere Seedraster als txt-file
37     Uebergebe Seedliste , Seedraster
```

Das Seedraster wurde schliesslich wieder ins ESRI-Rastervormat konvertiert. Im ArcGIS wurden dann die einzelnen Murkegelpixel mittels *reion-group* zu Regionen zusammengefasst und mit *unique identifiers* UID versehen.

4.8 Filterung

Erste Testläufe der Murkegelklassierung im Val Müstair stellten sich als völlig unbefriedigend heraus. Es fielen vor allem zwei Sachverhalte auf.

- Die Bergflanken östlich vom Kegel bei Tschierv und westlich von Müstair auf der anderen Talseite wurden mitklassiert.
- Gewisse Pixel lagen in Regionen, wo sie durch abrupte Neigungswechsel nicht zu Murkegelregionen heranwachsen konnten. In vereinzelt Fällen lagen diese Seedpixel nicht auf Murkegeln. Deshalb war es zwar sinnvoll, dass sie nicht zu grossen Regionen anwachsen aber sie mussten trotzdem entfernt werden.

Um die Klassierung zu verbessern, wurden deshalb zwei Filterschritte eingebaut.

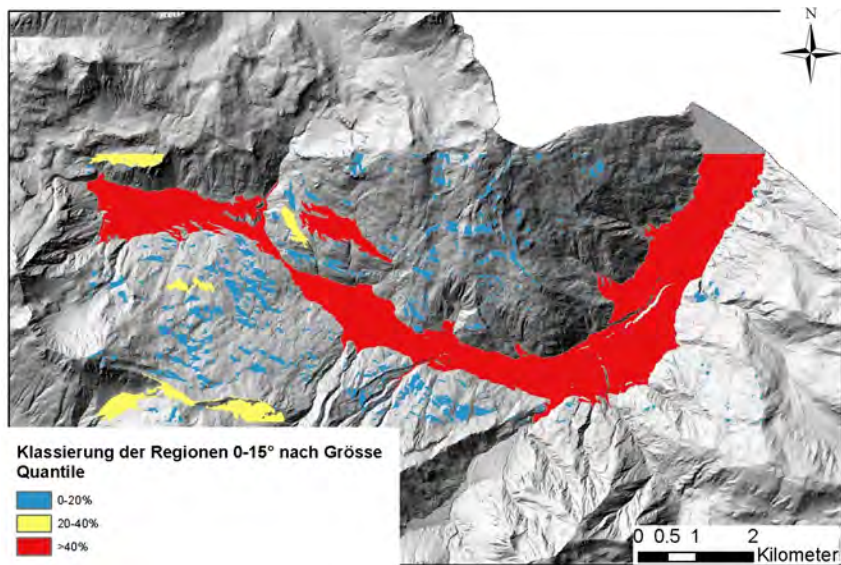
4.8.1 Neigungsfilterung

Die fälschliche Klassierung der Bergflanken erfolgte, weil gewisse Seedpixel auf ihnen zu liegen kamen, von wo aus sich die Regionen dann ausbreiteten. Gewisse kleinere Partien dieser Bergflanken wiesen die gleichen Eigenschaften wie die unteren Regionen der Murkegel auf. Sie waren in der XY-Ebene konvex, wurden von einem Gerinne durchquert und waren insbesondere sehr flach, was für Bergflanken untypisch ist. Die flachen Bereiche dieser Geländestufen waren aber zu klein, als dass sich auf ihnen Murkegel ablagern könnten. Deshalb wurde entschieden, diese kleinen Gebiete herauszufiltern. Dazu wurden aus dem Neigungsraster alle Gebiete mit Neigung zwischen 0-15 Grad mit dem

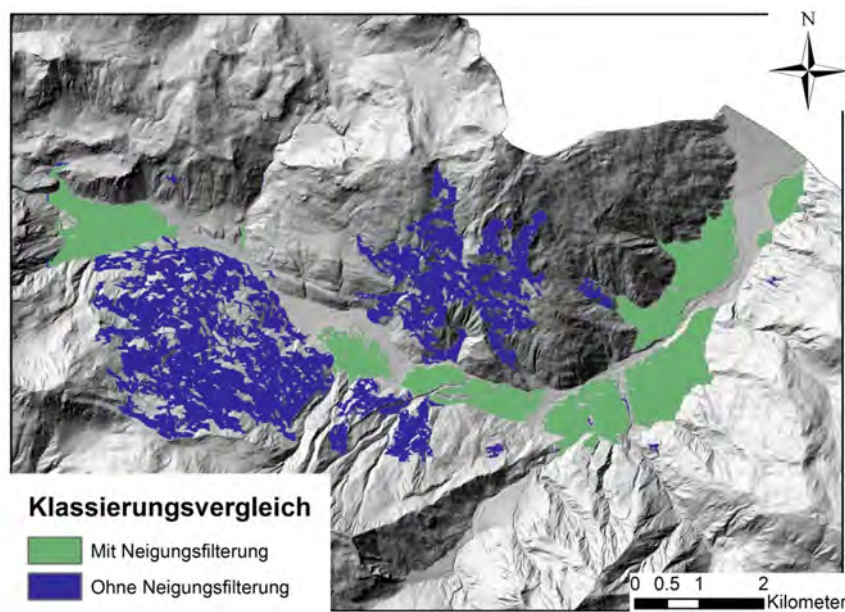
Wert 1 klassiert und alle anderen Gebiete erhielten den Wert -9999 (NoDATA). Dann wurden die Gebiete mit Wert 1 mittels der ArcMap-Funktion *region-group* zusammengefasst und nach Grösse (Anzahl Pixel/Gebiet) mittels Quantilen in fünf Klassen aufgeteilt. Regionen mit einer Anzahl Pixel $<$ als das 40%-Quantil wurden herausgefiltert, indem ihnen NoData-Werte zugewiesen wurde. Dann wurde dieses Raster mit dem Neigungsraster verschnitten, welches nur noch die Regionen zwischen fünf und 10 Grad enthielt. Somit kamen Seedpixel nur noch in den grösseren flachen Regionen zu liegen. Dieses Raster wurde dann als Seedinput mit dem Kurvaturaster und dem Flussnetzwerk erneut verschnitten. Die Überlegung hinter diesem Vorgehen war folgende: Murgänge und andere Massenablagerungsprozesse müssen auf eine grössere, flachere Zone treffen, damit sich das transportierte Material vollständig ablagert. Deshalb kann eine Trennung von kleinen und grösseren flachen Gebieten eine deutliche Verbesserung der Klassierung herbeiführen. Durch die Verwendung eines Grenzwerts zwischen 0 und 15 Grad wird sichergestellt, dass flache Regionen als homogene Flächen extrahiert werden können. Der untere Grenzwert sollte bezwecken, dass insbesondere das Haupttal als flache Zone extrahiert würde. Der obere Grenzwert von 15 Grad wurde durch wiederholte Filterungsversuche ermittelt und erwies sich als bester Grenzwert. Durch die Gruppierung der auf diese Weise extrahierten Regionen zu Zonen konnten grosse, flache Gebiete wie etwa der Talboden von kleinen Geländeschwellen getrennt werden. Abbildung 4.13 zeigt in a) die nach Grösse klassierten, flachen Gebiete und in b) sowohl das Resultat der Klassierung ohne Neigungsfilterung (blau) als auch mit Neigungsfilterung (grün). In a) sind die kleinen Gebiete (blau) auf den Bergflanken in der südwestlichen Region und im Norden des Val Müstair ersichtlich, die für die Fehlklassifikationen verantwortlich waren.

4.8.2 Grössenfilterung

Für die Grössenfilterung wurden die Murkegelzonen nach Grösse klassiert. Alle Gebiete mit einer Pixelanzahl, die unter dem Durchschnitt lagen, wurden ausgeschieden, indem ihnen NoDATA zugewiesen wurde. Aufgrund einiger Regionen mit nur einem oder wenigen Pixel und wenigen grossen Murkegelregionen sind die Grössen der Regionen nicht normalverteilt. Deshalb macht es Sinn, den Mittelwert als unteren Grenzwert zu verwenden. Die obere Grenze wurde absolut definiert. Gemäss JARMAN ET AL. (2011) weist die



(a) Neigungsfilterung



(b) Klassifikationsvergleich

Abbildung 4.13: Einfluss der Neigungsfilterung auf Klassifikationsergebnisse. Ohne Neigungsfilterung werden Bergflanken mitklassiert. Es resultiert eine ca. doppelt so grosse Fläche. Die grünen Gebiete überdecken Teile der blauen Gebiete. Verwendete Daten: Hillshade des swissALTI3D von swisstopo.

Malser Haide, der grösste Murkegel der europäischen Alpen eine Grösse von 16km^2 auf. Alle Gebiete die grösser sind als 17.6km^2 ⁹ wurden ebenfalls herausgefiltert.

4.9 Klassifikationsevaluation

Die Klassifikation der Murkegelextraktion wurde mit Hilfe einer Konfusionsmatrix evaluiert. Einerseits wurde die Evaluation auf Kegelebene durchgeführt, andererseits auf Pixelebene. Als Vorbereitung für die Evaluation wurden die Referenzpolygone innerhalb von ArcGIS in Rasterflächen konvertiert. Dann wurden das Referenzraster neu klassiert. Die Referenzkegel erhielten neu den Wert 2. Durch Addition der beiden Raster entstanden neu 4 Klassen:

- Klasse 0: richtig negativ = keine Murkegel klassiert, auf Referenz nicht vorhanden
- Klasse 1: falsch positiv = Murkegel klassiert aber auf Referenz nicht vorhanden
- Klasse 2: falsch negativ = keine Murkegel klassiert aber auf Referenz vorhanden
- Klasse 3: richtig positiv = Murkegel klassiert und auf Referenz vorhanden.

Die Anzahl Pixel pro Klasse wurde dann in die Konfusionsmatrix eingegeben. Wichtig für die Evaluation sind drei Grössen: Die Sensitivität, der positive prädiktive Wert (PPV von *positive predicting value*) und der Kappa-Koeffizient. Die Sensitivität gibt an, wie viele Murkegel durch die Klassifikation «erwischt» wurden. Der PPV gibt an, wie viele der klassierten Murkegel auch wirklich Murkegel sind. Der Kappa-Koeffizient ist ein Mass, welches durch Zufall entstandene, korrekte Klassierungen berücksichtigt und deshalb besser geeignet ist als die Gesamtgenauigkeit. Informationen zur Berechnung der Konfusionsmatrix und des Kappa-Koeffizient können der Arbeit von FIELDING & BELL (1997) entnommen werden.

⁹eine Reserve von 10% wurde eingeplant, da die durch Anzahl Pixel \cdot Pixelfläche berechnete Fläche aufgrund der planimetrischen Repräsentation der Pixelbreiten unterschätzt wird und eine Konversion in die tatsächliche Fläche ebenfalls Vereinfachungen beinhaltet

4.10 Statistikberechnungen

Um die Frage nach der Fläche und Gesamtneigung der Murkegel in der Schweiz beantworten zu können, wurden zwei kleine Hilfsfunktionen ¹⁰ geschrieben, welche die Fläche pro Kegel und die Neigung pro Kegel berechneten. Die Fläche A eines jeden Kegels wurde folgendermassen definiert:

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{w^2}{\cos g_i} \quad (4.16)$$

wobei w die Zellenbreite und g_i die Neigung der i -ten Zelle in Grad ist. Die globale Neigung S der Murkegel wurde durch den höchsten und den tiefsten Punkt eines Kegels definiert. Die verwendete Formel lautet:

$$S = \arctan \left(\frac{\Delta z}{\sqrt{(\Delta x^2 + \Delta y^2)}} \right) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (4.17)$$

Als Input benötigten beide Funktionen die Zellenbreite der verwendeten Raster und das Murkegelraster, in welchem jeder Murkegel mit eigener ID gekennzeichnet ist. Die Flächenfunktion benötigte zudem noch ein Neigungsraster, welches minimal geglättet war (3 x 3 Nachbarschaft). Die Funktionen übergaben keinen Wert sondern speicherten die Resultate direkt als Tabelle in ein .txt-File.

¹⁰Flächenfunktion: `calculate_area_per_zone`; Neigungsfunktion: `calculate_max_gradient`

5 Ergebnisse

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Klassierungen für die in Kapitel 3 beschriebenen Untersuchungsgebiete Mattertal und Goms präsentiert. Auf das Val Müstair wird nicht genauer eingegangen, da es als Trainingsgebiet diente. Die Resultate sind nach den Untersuchungsgebieten und den verwendeten Datensätzen gegliedert. Der Abschluss des Kapitels wird durch die Ergebnisse der Neigungs- und Flächenberechnungen gebildet.

5.1 Klassifikation des Mattertals mittels swissALTI3D

Von den Untersuchungsgebieten wurde zuerst das Mattertal und seine Murkegel klassiert. Für die Klassierung wurden nur die Gebiete des Tales berücksichtigt, welche auch Murkegel enthielten, da sonst die Datenmenge zu gross gewesen wäre. Die Gegend um Zermatt als auch die schluchtartige Strecke zwischen Feld und Stalden nicht in die Klassierung mit einbezogen.

5.1.1 Grenzwerte und Güte der Abflussmodellierung

Tabelle 5.1 zeigt die für die Klassierung der Murkegel im Mattertal verwendeten *land-surface parameter* Grenzwerte, sowie die zur Filterung der Grösse verwendete Anzahl Pixel und die Gütemasse der Abflussakkumulation $LRMSE$ und $LRMSE_{ref}$. Auf diese Werte wird etwas genauer eingegangen, da die Abflussakkumulation wie bereits erwähnt aufgrund ihrer linearen Form einen sehr grossen Einfluss auf die räumliche Verbreitung der Seedpixel und somit auf die Murkegelklassifikation hat und sich gleichzeitig qualitativ wie auch quantitativ sehr gut beschreiben lässt.

Die Abweichung der modellierten Abflussakkumulation zum Referenz-Flussnetzwerk $LRMSE$ liegt bei 635.69 Metern. Dieser Wert ist erstaunlich hoch und überrascht, da in der Literatur erwähnte Werte des $LRMSE$ bei Abflussnetzwerken, welche durch

Tabelle 5.1: Zur Klassifikation der Murkegel im Mattertal verwendete Werte. R entspricht dem Kreisradius, der der Oberflächenkrümmung an einem bestimmten Punkt am besten entspricht.

Parameter	Wert	Einheit
Neigung Seeds	5 - 10	Grad
Neigung Grenzwerte	5 - 25	Grad
Kurvatur	0 - 1.99	1/R
Abfluss-Untergrenze	300800	-
LRMSE	635.69	m
LRMSE_ref	156.74	m
Untergrenze Kegelgrösse	4288	Pixel

DHM mit ähnlicher Auflösung (1-5m) generiert wurden, um das zehnfache bis 20-fache tiefer liegen (ANDERSON ET AL. (2014), YANG ET AL. (2014)). Es ist kaum möglich, dass der Unterschied von der Wahl des Abflussalgorithmus her rührt. Der Grund ist ein anderer. Bei genauerer Analyse der Differenzen zwischen den Punkten der Abflussakkumulation zu den Segmenten des Referenzflussnetzwerks fällt auf, dass nur einige wenige Segmente einen Abstand von einigen hundert Metern bis zu mehreren Kilometern zu den Punkten aufweisen (beispielsweise Segment 331 in Tabelle 5.2).

Die Mehrzahl der Punkte, welche eine solch enorme Abweichung zu den Segmenten aufweisen, liegen auf Gletschern oder im Übergangsbereich zu Gletschervorfeldern (siehe Abbildung 5.1). In diesen Gebieten ist in der Referenz kein Abfluss in Form eines Gerinnes vorhanden, was dazu führt, dass die Distanzen der Punkte auf den Gletschern zu den Segmenten im Gletschervorfeld gemessen werden. Betrachtet man die Übereinstimmung der jeweiligen Abflussakkumulationen in tieferen, konvexeren Lagen, ist diese aber wieder relativ hoch. In der folgenden Abbildung wird der Sachverhalt anhand von zwei Ausschnitten des Mattertals dargestellt. In a) ist die Abflussakkumulation (schwarz) und das Referenz-Flussnetzwerk (rot) im Ablationsbereich des Riedgletschers, östlich des Mattertals abgebildet. In b) ist ein Talausschnitt bei Randa abgebildet. Hier stimmt der Verlauf der Abflussakkumulation (schwarz) mit demjenigen der Referenz (rot) sehr gut

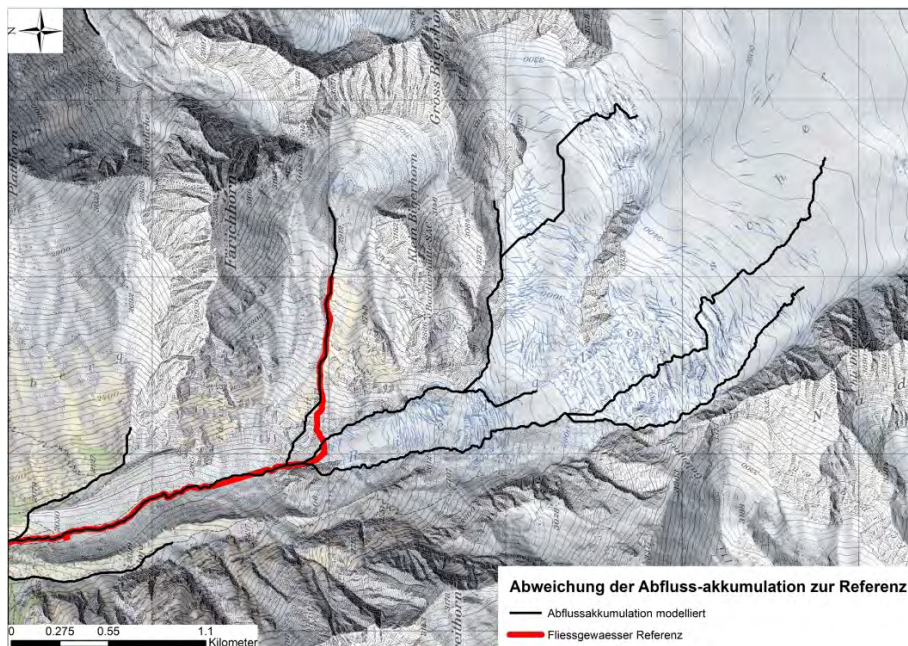
Tabelle 5.2: Distanzwerte für Punkte des Abflussnetzwerks zu den Segmenten der Referenz. Das obere Segment (215) weist erwartete Distanzen auf, das untere zeigt eine Abweichung $> 1\text{km}$.

PunkteID	Segment_ref_FID	Distanz [m]
1	215	5.89
2	215	8.33
3	215	1.75
...
1853	331	1100.27
1854	331	1095.91
1855	331	1100.80

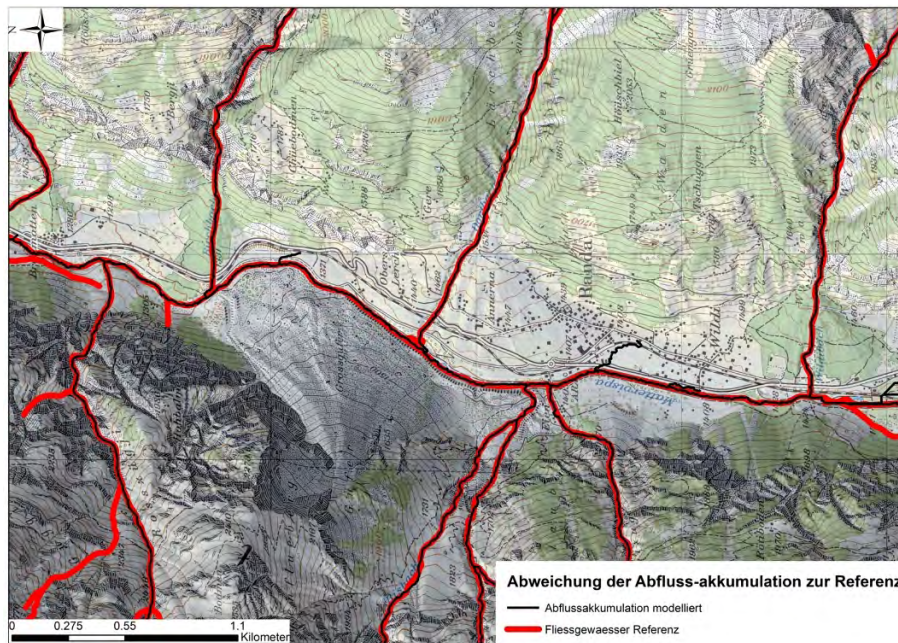
überein, während die Abweichung beim Riedgletscher deutlich ersichtlich ist. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sowohl ANDERSON ET AL. (2014) als auch YANG ET AL. (2014) die zu langen Segmente der Modellierung manuell auf die Länge der Referenz gekürzt haben. Somit wird klar, weshalb eine solche Diskrepanz zwischen den von ihnen überlieferten Resultaten und denjenigen in der vorliegenden Arbeit herrscht.

Der $LRMSE_{ref}$ liegt mit 156.74 Metern ebenfalls in einem hohen Bereich, jedoch ist die Abweichung deutlich weniger hoch als diejenige des $LRMSE$. Der Wert des $LRMSE_{ref}$ weist darauf hin, dass einige Seitenflüsse des Flussnetzwerks nicht modelliert wurden. Eine visuelle Kontrolle bestätigt dies. Drei solche Fälle sind in Abbildung 5.1 b) auf der linken Seite zu sehen (nördlich von Randa). Grund für das Fehlen dieser Abflussverzweigungen ist, dass der untere Schwellenwert für die Abflussakkumulation in diesen Fällen zu tief ist, um einen Abfluss modellieren zu können. Deshalb erstaunt es nicht, dass die meisten Fälle dieser nicht modellierten Abflussverzweigungen in höheren Lagen, also zu Beginn des Abflussprozesses erscheinen.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass sowohl der $LRMSE$ als auch der $LRMSE_{ref}$ relativ gross sind, was primär auf starke Abweichungen in hoch gelegenen Regionen zurück zu führen ist, wo die Abflussakkumulation noch relativ niedrig ist. Im Talboden des Matternals ist die Übereinstimmung hoch, was aufgrund der stark konkaven Form dieses Tals auch zu erwarten war.



(a) Starke Abweichung im Gletschergebiet



(b) Gute Übereinstimmung im Tal

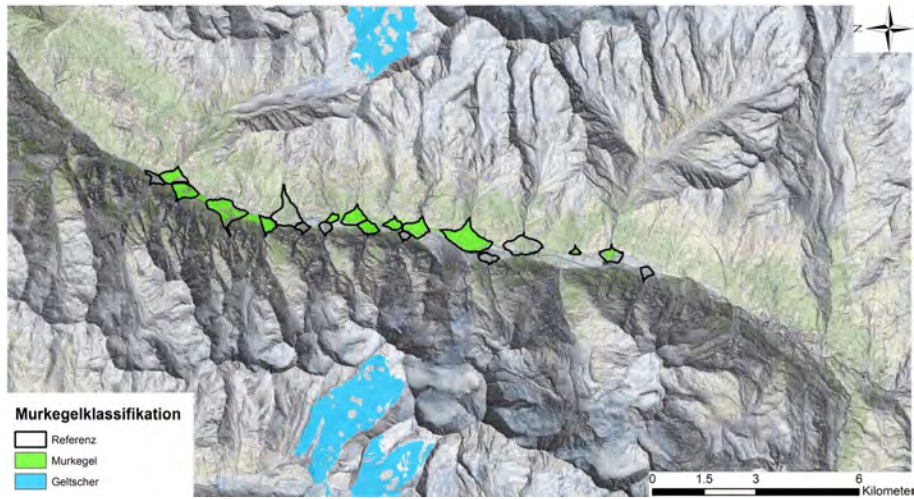
Abbildung 5.1: Vergleich der Abflussmodellierungen in verschiedenen Regionen. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 von swisstopo.

5.1.2 Nachfilterung mittels Rauigkeitsindex

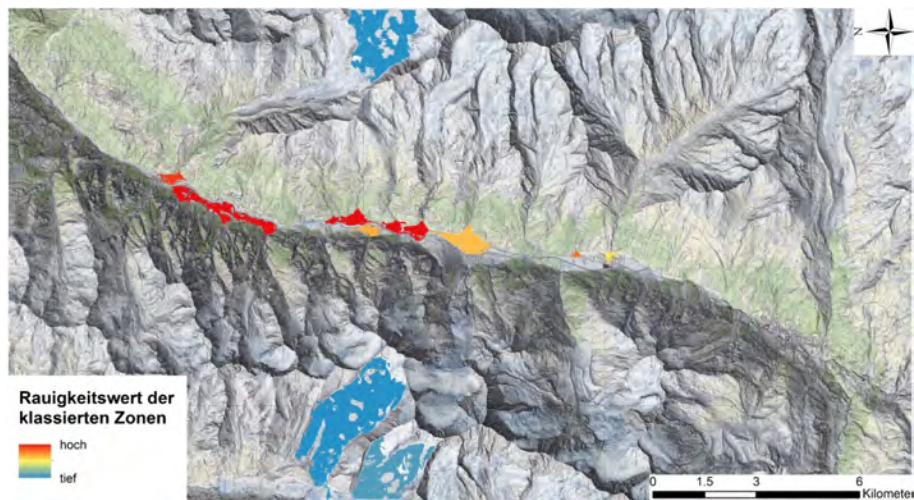
Das erste Ergebnis nach der Durchführung des *region-growing* Algorithmus zeigt den Einfluss des auf den Gletschern modellierten Abflusses. In Abbildung 5.2 a) ist ersichtlich, dass nebst Murkegeln auch drei Gletscher als Murkegel klassifiziert wurden. Da es oberhalb des Val Müstair in der näheren Umgebung keine Gletscher gibt, war diese Problematik neu. Die Gletscher in der Klassifikation machen flächenmässig einen grossen Anteil aus, was einen erheblichen Einfluss auf die Güte der Klassifikation hat. Anscheinend weisen Gletscher in Bezug auf die verwendeten *land-surface parameter* ähnliche Charakteristika auf, wie Murkegel. Im Vergleich zu den Bergflanken, die sie umgeben, weisen sie eine deutlich geringere Neigung auf und die Oberfläche des Eises bildet auch eine gerade bis leicht konvexe Form aus. Zusammen mit der auf der Gletscheroberfläche modellierten Abflussakkumulation ergibt sich also eine Kombination, welche den Kriterien der Murkegelklassifikation entspricht.

Da die Oberfläche der Murkegel aufgrund der Murgangablagerungen rau ist, wurde für alle klassierten Gebiete die mittlere Rauigkeit mittels Rauigkeitsindex gerechnet. Die Erwartung war, dass die klassierten Gletscheroberflächen deutlich geringere Werte aufweisen würden als die Murkegel, insbesondere da raue Flächen der Gletscher wie beispielsweise Gletscherspalten aufgrund der starken, lokalen Neigungsunterschiede nicht klassiert worden waren. Wie Abbildung 5.2 b) und Tabelle 5.3 zeigen, ist dies für die Murkegel des Mattertals tatsächlich der Fall.

Wie man sieht, besteht zwischen den Murkegeln und den Gletschern im Mattertal ein Rauigkeitsunterschied von ca 0.064. Aufgrund der kleinen und ungleichen Anzahl der Gletscher und Murkegel, ist es schwierig zu sagen, ob der Rauigkeitsindex ein guter Parameter ist, um Gletscher von Murkegeln zu unterscheiden. Durch Hinzuziehen der Regionen im Goms wird diese Frage aber später in der Arbeit noch geklärt. Sollte der Rauigkeitsindex nicht geeignet sein, müsste man wohl auf zusätzliche Datensätze wie beispielsweise eine Gletschermaske ausweichen. Für das Mattertal wurden die Gletscher fürs Erste durch die Anwendung eines Rauigkeitgrenzwerts *Murkegel* > 0.084 auf alle klassierten Gebiete entfernt.



(a) Klassierte Gebiete



(b) Rauigkeitswerte der klassierten Gebiete

Abbildung 5.2: Unterschiede der Gletscher und Murkegel des Matternals in ihrer Oberflächenrauigkeit. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 und swis-ALTI3D Hillshade von swisstopo.

Tabelle 5.3: Durchschnittliche Rauigkeitswerte der klassierten Gebiete im Matternal

Klassiertes Gebiet	Anzahl Pixel / Region	Rauigkeitswert
Bruneggletscher	1083364	0.057
Riedgletscher	572722	0.075
Turtmannletscher	487659	0.083
Murkegel Täsch	13199	0.147
Murkegel Randa	142436	0.159
Murkegel Zenachern	34016	0.163
Murkegel Täsch Nord	6700	0.182
Murkegel Feld	35258	0.197
Kegelgruppe Herbriggen	156942	0.205
Kegelgruppe St. Niklaus	184729	0.207

5.1.3 Klassifikationsergebnisse unter Verwendung des swissALTI3D-DHM

Nach der Nachfilterung mittels Rauigkeitsindex und der Grössenfilterung (siehe Untergrenze Kegelgrösse in Tabelle 5.1) wurde die resultierende Klassifikation auf Kegel- und Pixelebene evaluiert. Die Evaluation auf Kegelebene ergab folgendes:

- Sechs Murkegel haben keinen Seedpixel erhalten (Esch, Mattwald, Mattmatte, Tummigbach, Wildi, Breitmatten)
- 12 von 20 Murkegeln wurden durch den Algorithmus erkannt und extrahiert. Das ergibt eine Sensivität von 60%
- sechs Murkegel wurden als zwei Murkegelgruppen à je drei Murkegel klassiert
- Da keine Nicht-Kegel kartiert wurden, lässt sich kein PPV berechnen

Für eine genauere Evaluation gibt die Betrachtung auf Pixelebene mehr Aufschluss. Gemäss der Konfusionsmatrix in 5.4 fällt die Sensitivität auf 47% und der PPV liegt bei guten 88%. Der Vergleich zur Kegelebene zeigt, dass nebst den nicht klassierten Kegeln einige der klassierten Kegel nur durch wenige Pixel repräsentiert wurden. In der Klassifikationsdarstellung (siehe Abb. 5.3) ist beispielsweise ersichtlich, dass die Flächen der

Murkegel von Feld im Norden des Mattertals und Täsch im Süden des Mattertals nur teilweise erfasst wurden. Des Weiteren sind mit dem «Grosse Grabe» südlich der Kegelgruppe St.Niklaus und dem Kegel bei Wildi südlich von Täsch zwei der grösseren Kegel nicht erfasst worden, was sich prozentual relativ stark auf die Sensitivität auswirkt. Der

Tabelle 5.4: Konfusionsmatrix der Klassifikationsresultate der Murkegel des Mattertals

		Referenz			PPV [%]
		Kegel	Kein Kegel	Tot. Klassifikation	
Klassifikation	Kegel	504321	68959	573280	87.97
	Kein Kegel	564399	54086798	54651197	98.97
	Tot. Referenz	1068720	54155757	55224477	
	Sensitivität [%]	47.19	99.87		98.85
Cohen's Kappa		0.61			

PPV von knapp 88% deutet darauf hin, dass die Klassierung der Kegel sehr zuverlässig ist und keine anderen Gebiete klassiert. Allerdings wurden die falsch klassierten Gletscher bereits herausgefiltert. Zwischen den Murkegeln der Kegelgruppe von St.Niklaus, als auch zwischen denen der Kegelgruppe Herbruggen, sind die Grenzen der Murkegel nicht komplett erfasst und deshalb auch Zwischenräume der Kegel klassiert worden (siehe Abb. 5.3), was zur Senkung des PPV beiträgt. Für die Beschreibung der Gesamtqualität der Klassifikation wurde der Kappa-Koeffizient benutzt (LANDIS & KOCH, 1977). Gemäss den Autoren handelt es sich bei Werten zwischen 0.4 und 0.75 um eine gute Übereinstimmung zwischen Klassifikation und Realität. Demzufolge ist die Übereinstimmung im Mattertal mit einem Wert von 0.61 gut.

5.2 Klassifikation des Mattertals mittels DHM25

5.2.1 Grenzwerte und Güte der Abflussmodellierung

Die Klassifikation des Mattertals mittels DHM25 erforderte aufgrund der gröberen horizontalen Auflösung der Zellen andere Grenzwerte zur Extraktion der Murkegel. Für die Abflussakkumulation ergeben sich beispielsweise um Grössenordnungen kleinere Abfluss-

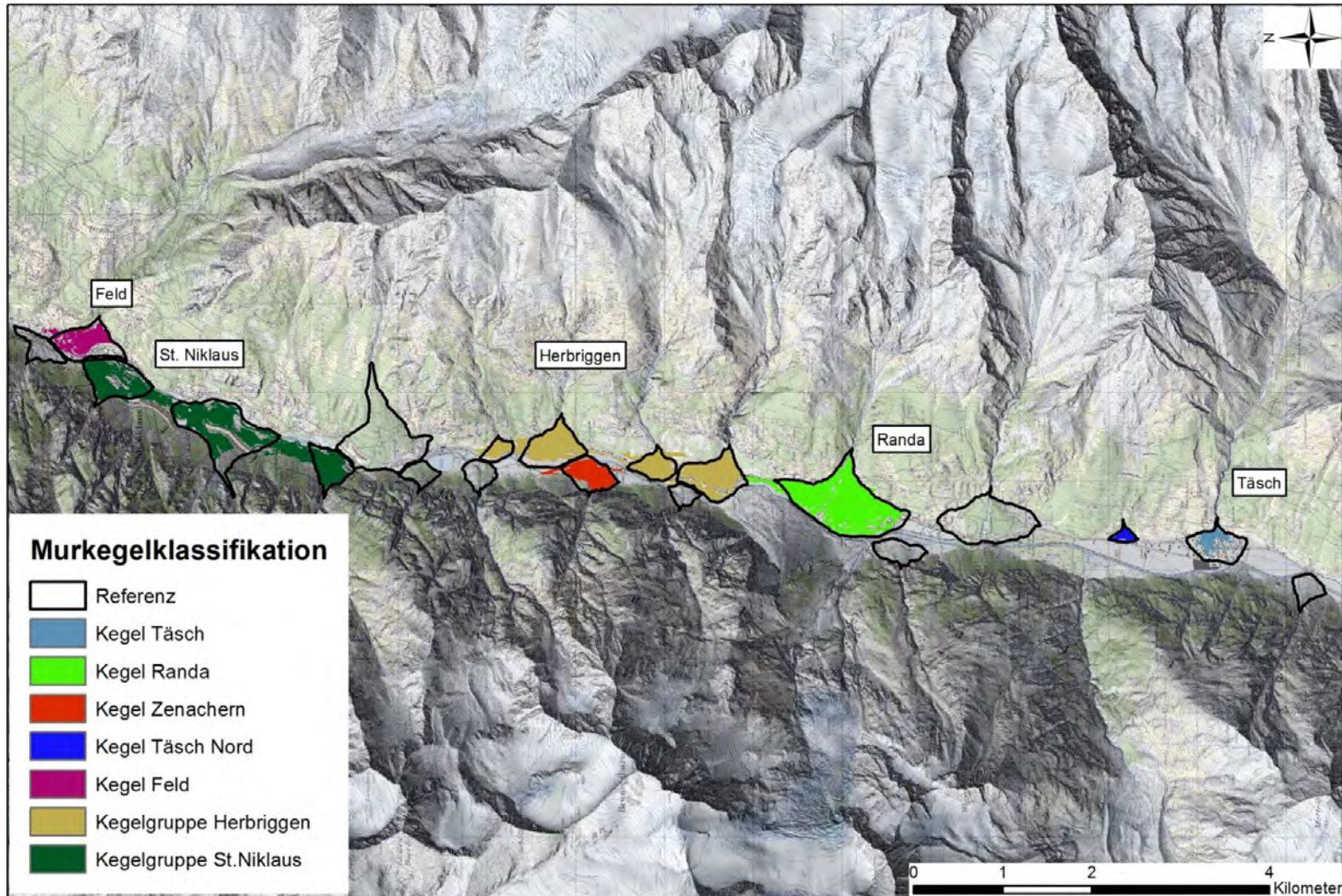


Abbildung 5.3: Klassifikation des Mattertals mittels swissALTI3D nach Gletscher- und Grössenfilterung. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 und swissALTI3D Hillshade von swisstopo.

werte, dementsprechend fiel die Abfluss-Untergrenze tiefer aus. Tabelle 5.5 enthält die verwendeten Werte.

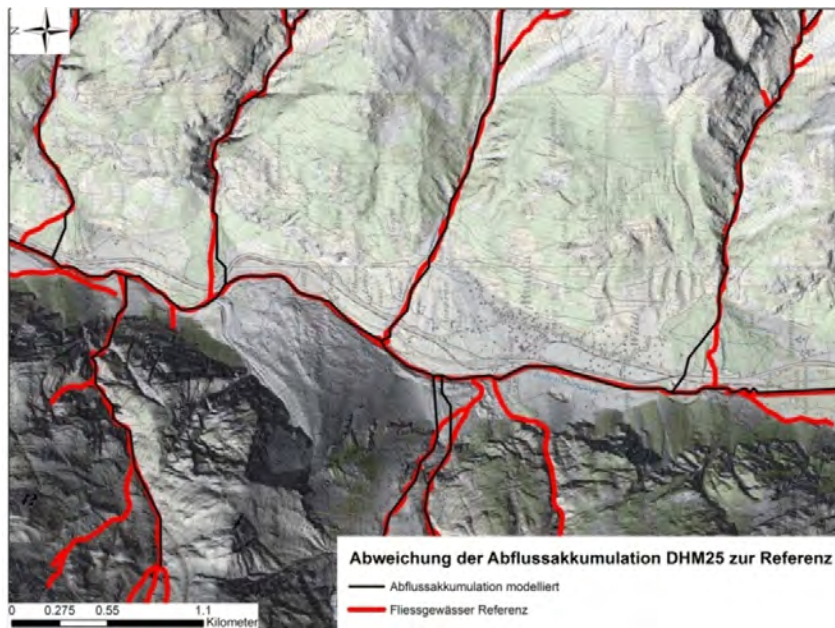
Tabelle 5.5: Zur Klassifikation des Mattertals mittels DHM25 verwendete Werte.

Parameter	Wert	Einheit
Neigung Seeds	5 - 10	Grad
Neigung Grenzwerte	5 - 25	Grad
Kurvatur	0 - 1.43	1/R
Abfluss-Untergrenze	1598	-
LRMSE	569.05	m
LRMSE_ref	256.63	m
Untergrenze Kegelgrösse	298	Pixel

Der $LRMSE$ ist mit 569 Metern um etwa 60 Meter kleiner als derjenige für die Modellierung mit dem swissALTI3D. Allerdings ist die Abweichung immer noch beträchtlich. Der Grund für die Größenordnung liegt wiederum grösstenteils in der Modellierung von Abflüssen auf dem Gletscher. Die Übereinstimmung im Talboden ist wiederum einiges besser. Vergleicht man den $LRMSE_{ref}$ mit demjenigen für die Modellierung mittels swissALTI3D, so fällt auf, dass der $LRMSE_{ref}$ in diesem Fall einiges höher liegt. Dies bedeutet, dass die Standardabweichung der Referenzpunkte zur modellierten Abflussakkumulation relativ gross war. Aufgrund der Verwendung unterschiedlicher Klassierungsmethoden (siehe Abschnitt 4.6.4) je nach DHM, lassen sich die Zahlen der verschiedenen Gütemasse nicht direkt quantitativ vergleichen. Sie liefern aber Hinweise auf mögliche Unterschiede, die sich dann jeweils visuell überprüfen lassen. So deutet der höhere $LRMSE_{ref}$ im zweiten Fall darauf hin, dass gewisse Verästelungen des Flussnetzwerks durch die Abflussakkumulation nicht modelliert wurden. Die Übereinstimmung mit der Referenz ist zwar immer noch relativ gut aber deutlich schlechter, als dies beim swissALTI3D der Fall war. In Abbildung 5.4 sind wieder Ausschnitte des Riedgletschers und des Mattertals bei Randa abgebildet. Im Vergleich zur Modellierung mittels swissALTI3D ist die Übereinstimmung insbesondere westlich von Randa auf der gegenüberliegenden Flanke einiges schlechter. Ebenfalls wird der von Ost nach West verlaufende Abfluss nördlich des Riedgletschers nicht modelliert.



(a) Abflussmodellierung beim Riedgletscher



(b) Abflussmodellierung bei Randa

Abbildung 5.4: Abweichung der Abflussakkumulation zur Referenz im Gletscherbereich und im Tal. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 und swissAL-TI3D Hillshade von swisstopo.

5.2.2 Nachfilterung mittels Rauigkeitsindex

Die Rauigkeitswerte der Gletscher und Murkegel unterscheiden sich nicht voneinander, wenn sie auf Basis des DHM25 gerechnet werden. Die horizontale und vertikale Auflösung sind zu grob, um kleinräumige Rauigkeiten, wie sie durch Murgangablagerungen entstehen, detektieren zu können. Um einen direkten Vergleich zwischen den beiden Klassifikationen mittels swissALTI3D und DHM25 zu machen, wurden die Gletscher anhand ihrer Höhe über Meer raus gefiltert, da sie alle deutlich höher lagen als die Murkegel. Dieser Ansatz funktioniert im Mattertal, welches grosse Höhenunterschiede zwischen Talboden und Berggipfeln aufweist und zudem sehr steil ist, was dazu führt, dass sämtliche Murkegel in der Talregion angesiedelt sind. Zu glauben, dass dies deshalb überall funktioniert, wäre allerdings falsch. Wiederum wäre eine zuverlässige Variante die Filterung der Gletschers mittels einer Gletschermaske unter Einbezug von Fernerkundungsdaten.

5.2.3 Klassifikationsergebnisse unter Verwendung des DHM25

Die Evaluation der Klassifikation mittels DHM25 auf Kegelebene ergab folgendes:

- 11 Murkegel haben keinen Seedpixel erhalten (Esch, Blattbach, Mattwald, Mattmatte, Tummigbach, Herbruggen, Zen Achern, Breitmatten, Breitmatten 2, Birchbach, Schusslauizug)
- 11 von 20 Murkegeln wurden durch den Algorithmus erkannt und extrahiert. Das ergibt eine Sensivität von 55%
- 10 Murkegel wurden als zwei Murkegelgruppen à sechs respektive vier Murkegel klassiert
- Der Kegel von Randa wurde gesondert klassiert

Es ist anzumerken, dass durch die Grössenfilterung mit Untergrenze von 298 Pixel korrekt klassierte Kegelpartien der Murkegel bei Wildi, Täsch und Mettelzug herausgefiltert wurden. Auf Kegelebene schliesst die Klassifikation unter Verwendung des DHM25 trotzdem besser ab, als diejenige mittels swissALTI3D. Um die Klassifikation allerdings genauer zu evaluieren, empfiehlt sich ein Blick auf die Konfusionsmatrix (siehe Tabelle 5.6). Die Sensitivität liegt im Vergleich zur Klassierung mittels swissALTI3D höher, während der PPV

Tabelle 5.6: Konfusionsmatrix der Klassierung des Mattertals mittels DHM25

		Referenz			PPV [%]
		Kegel	Kein Kegel	Tot. Klassifikation	
Klassifikation	Kegel	4660	2293	6953	67.02
	Kein Kegel	2194	69456	71650	96.94
	Tot. Referenz	6854	71749	78603	
	Sensitivität [%]	67.99	96.80		94.29
Cohen's Kappa		0.64			

gesunken ist. Dass die Sensitivität höher liegt, mag erstaunen, da weniger Kegel extrahiert wurden. Der Grund liegt darin, dass zwei kleinere Kegel in diesem Falle nicht extrahiert wurden (Täsch und Täsch Nord), dafür aber der Kegel «Grosse Grabe», welcher der grösste seiner Art im Mattertal ist. Wenig überraschend ist das Sinken des PPV, da einige Kegelzwischenräume mitklassiert wurden. Insgesamt resultiert so ein Kappa-Koeffizient von 0.64, was einer leichten Verbesserung der Klassifikation gleichkommt. Es darf aber nicht vergessen werden, dass eigentlich keine Gletscherfilterung anhand des DHM hätte vorgenommen werden können und somit der PPV sehr schlecht gewesen wäre, zumal die Gletscher flächenmässig einen einiges grösseren Anteil ausmachen. Die Gesamtklassifikation des Mattertals ist in Abbildung 5.5 ersichtlich.

5.3 Klassifikation des Goms mittels swissALTI3D

5.3.1 Grenzwerte und Güte der Abflussakkumulation

Die Untersuchung der *land-surface parameter* im Goms ergab die in Tabelle 5.7 aufgelisteten Werte zur Klassifikation. Die Abweichung der modellierten Abflussakkumulation zum Referenz-Flussnetzwerk *LRMSE* beträgt im Goms noch 306 Meter, also rund die Hälfte der Abweichung im Mattertal. Zwar werden Abflüsse auf dem Oberaargletscher modelliert, aber in diesem Fall wurde von der swisstopo ein Abfluss unterhalb des Gletschers, der Oberaarbach, kartiert (siehe Abbildung 5.6a)). Aufgrund dessen sind die Abweichungen im Gletscherbereich einiges kleiner. Der breitere, weniger konkave Talboden bewirkt, dass die Abflüsse im Tal nicht so genau wie im Mattertal modelliert werden und kleine

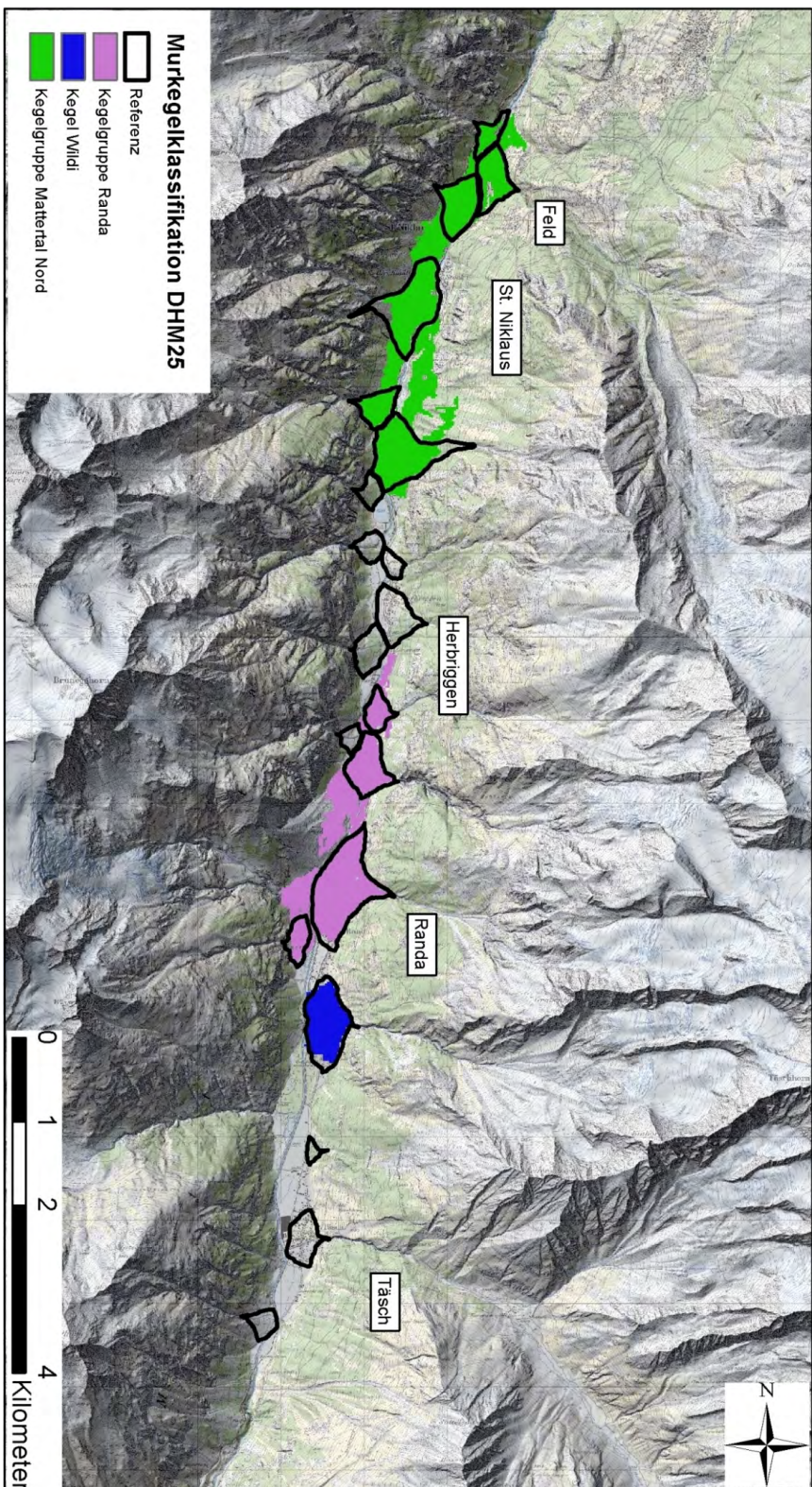


Abbildung 5.5: Klassifikation des Mattertals unter Verwendung des DHM25. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 und swiss.ALTI3D Hillshade von swisstopo.

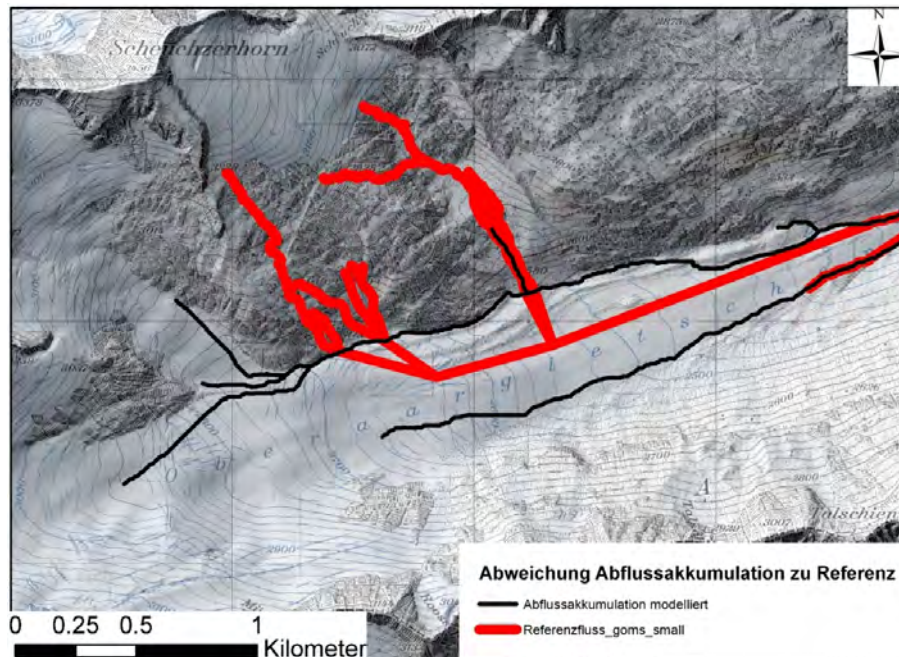
Tabelle 5.7: Zur Klassifikation des Goms verwendete Werte.

Parameter	Wert	Einheit
Neigung Seeds	5 - 10	Grad
Neigung Grenzwerte	5 - 25	Grad
Kurvatur	0 - 1.93	1/R
Abfluss-Untergrenze	119565	-
LRMSE	306.22	m
LRMSE_ref	222.27	m
Untergrenze Kegelgrösse	2937	Pixel

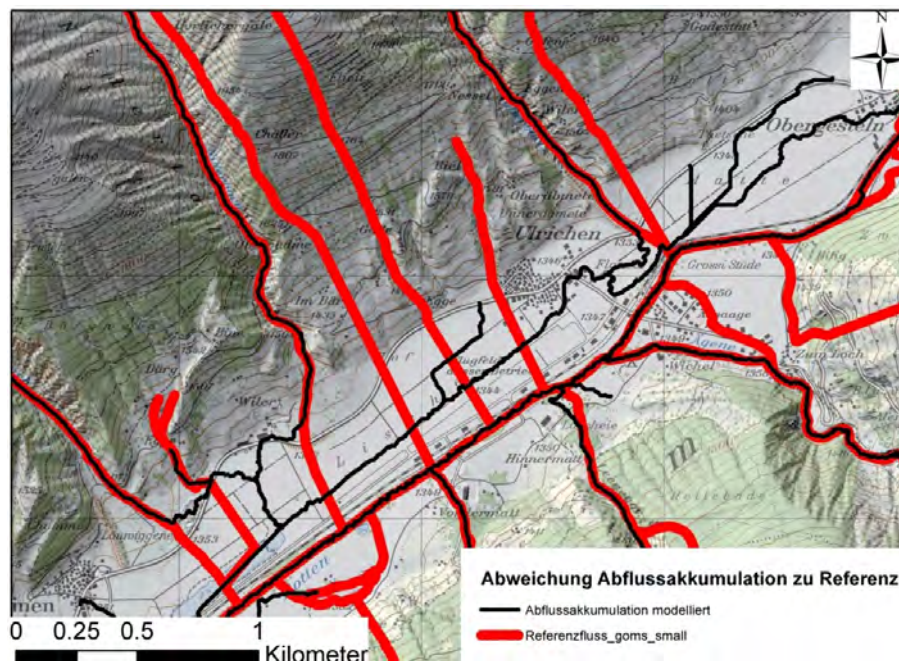
Abflussäste resultieren, die eigentlich nicht existieren (siehe Abbildung 5.6 b)). Umgekehrt gibt es an den Talflanken des Goms relativ viele Abflüsse, die nicht modelliert wurden (ebenfalls Abbildung 5.6 b)), weshalb der *LRMSE* etwas höher liegt als derjenige für das Mattertal. Eine visuelle Überprüfung zeigt aber, dass die Gerinne der Murkegel im Tal relativ genau modelliert worden sind.

5.3.2 Nachfilterung mittels Rauigkeitsindex

Wie bereits im Fall des Mattertals wurden wieder Gletscher als Murkegel klassiert. Diesmal handelt es sich um den Gries- und den Oberaargletscher. Um diese zu eliminieren, wurde für die klassierten Zonen wieder die mittlere Rauigkeit pro Zone gerechnet. Die beiden Gletscher weisen wiederum die tiefste Rauigkeit auf, jedoch liegt die Oberflächenrauigkeit zweier Kegel in einem ähnlichen Wertebereich. Beide Werte liegen zwar über der Rauigkeit von den bisher untersuchten Gletschern aber angesichts der kleinen Unterschiede kommen Zweifel auf, ob die Oberflächenrauigkeit geeignet ist, um Gletscher von Murkegeln zu diskriminieren. Eine statistische Untersuchung sollte deshalb Aufschluss geben. Um die Stichprobengrösse von Gletschern und Murkegeln auszugleichen, wurden einige Gletscherzonen zusätzlich kartiert. Insgesamt wurden je 28 Murkegel und Gletscher verglichen. Die Verteilung ist in den Boxplots in 5.7 abgebildet. Anhand der Verteilung wird ersichtlich, dass ein Unterschied in den Rauigkeitsverteilungen der beiden Gruppen



(a) Abflussmodellierung auf dem Oberaargletscher



(b) Abflussmodellierung im Talboden des Goms

Abbildung 5.6: Relativ gute Übereinstimmung der Abflüsse am Oberaargletscher und Abweichungen im Tal. An den Bergflanken wurden Abflussmodellierungen unterlassen, während inexistente Abflüsse im Talboden modelliert wurden. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 und swissALTI3D Hillshade von swisstopo.

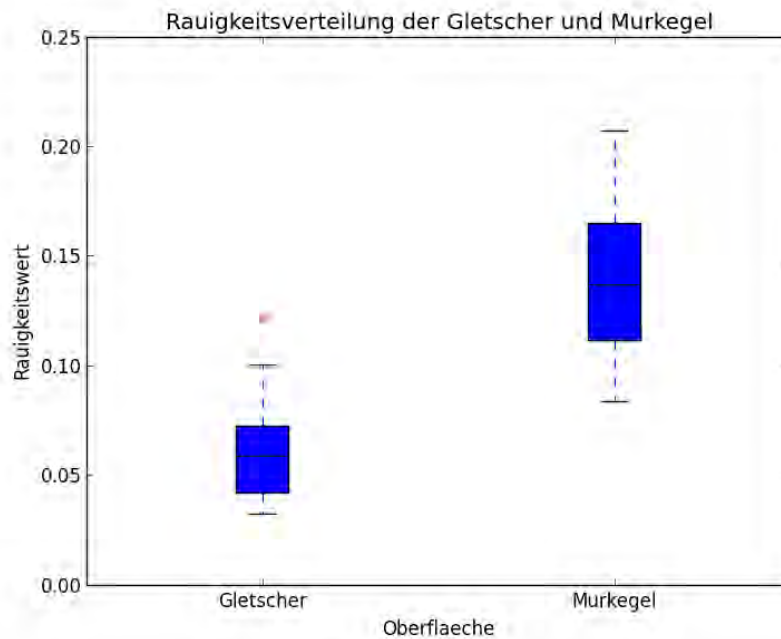


Abbildung 5.7: Verteilungen der Rauigkeitswerte von Gletschern und Murkegeln

besteht, jedoch gibt es sowohl für die Murkegel als auch für die Gletscher Fälle, welche anhand der Rauigkeit nicht von der anderen Gruppe unterschieden werden können, da sich die *whisker*-Bereiche überlappen. Die beiden Datensätze wurden zur weiteren Analyse mittels Kolmogorov-Smirnov-Test auf Normalverteilung und mittels T-Test für zwei unabhängige Stichproben auf Unterschiede der Mittelwerte untersucht. Sowohl die Gletscher als auch die Murkegel folgen einer Normalverteilung (da ihre asymptotische Signifikanz mit 0.743 respektive 0.994 über dem Signifikanzniveau von 0.05 liegt) und die Mittelwerte der beiden Oberflächen unterscheiden sich signifikant für einen Konfidenzintervall von 95% (Asymptotische Signifikanz von 0.000). Allerdings besteht keine Varianzhomogenität. Wäre dies der Fall, könnte man anhand der beiden Rauigkeitsmittelwerte aussagen, dass sich die Rauigkeiten der beiden Oberflächen grundlegend unterscheiden, so weiss man jedoch nur dass der Unterschied der beiden Mittelwerte signifikant ist und nicht auf Zufall beruht. Da für eine zuverlässige Unterscheidung keine Überschneidungen stattfinden sollten, ist es besser, die Filterung der Gletscher auch für das swissALTI3D mittels Gletschermaske zu vollziehen, sofern dieser Datensatz vorhanden ist. Ansonsten ist es

mit gewissen Genauigkeitseinbussen auch möglich, die Filterung mittels Rauigkeit vor zu nehmen.

5.3.3 Klassifikationsergebnisse unter Verwendung des swissALLTI3D-DHM

Die Evaluation der Klassifikation des Goms zeigt gesamthaft bessere Resultate als für das Mattertal, vorausgesetzt, dass die Gletscher herausgefiltert werden. Auf Kegelebene resultiert:

- Drei Murkegel haben keine Seedpixel erhalten (Riti,Riti klein,Überrotten, Oberwald)
- 23 von 27 Kegeln werden extrahiert. Dies entspricht einer Sensitivität von 85%
- Insgesamt wurden drei Kegelgruppen à zwei bzw. drei Kegel gebildet.
- Zwei Flächen wurden fälschlicherweise als Kegel klassiert.

In der Konfusionsmatrix 5.8 für die Klassierung des Goms zeigt sich, dass die Sensitivität gegenüber der Klassierung im Mattertal mit einem Wert von 58% höher liegt. Andererseits ist der PPV auf 76% gesunken. Der Kappa-Koeffizient liegt bei 0.65, was einer leicht besseren Klassierung im Vergleich zum Mattertal gleichkommt. Berechnet man die Konfusionsmatrix ohne Gletscherfilterung, so resultieren eine Sensitivität von 58%, ein PPV von knapp 52% und ein Kappa-Koeffizient von 0.53. Die Abbildung der Klassifikation 5.8 zeigt

Tabelle 5.8: Konfusionsmatrix der Klassierung für das Goms, nach der Gletscherfilterung

		Referenz			
Klassifikation		Kegel	Kein Kegel	Tot. Klassifikation	PPV [%]
	Kegel		1082399	338726	1421125
Kein Kegel		783595	45424783	46208378	98.30
Tot. Referenz		1865994	45763509	47629503	
Sensitivität [%]		58.01	99.26		97.64
Cohen's Kappa		0.65			

eine relativ gute Übereinstimmung der klassierten Kegel mit der Referenz und im Vergleich zum Mattertal wurden die einzelnen Kegel gut voneinander getrennt. Im Südwesten des Goms Richtung Niederwald, wo das Tal enger wird, wurden die Kegel nur teilweise oder sogar gar nicht klassiert, was hauptsächlich zu einer Einbusse in der Sensitivität führte. Hauptgrund für den tieferen PPV ist das Vorkommen zweier Falschklassierungen.

5.4 Klassifikation des Goms mittels DHM25

5.4.1 Grenzwerte und Güte der Abflussakkumulation

Die in Tabelle 5.9 wurden für die Klassifikation mittels DHM25 verwendet. Sie gleichen denen, die für das Mattertal und das DHM25 verwendet wurden, relativ stark. Der $LRMSE$ liegt etwas tiefer als im Mattertal, der $LRMSE_{ref}$ liegt etwas darüber, wiederum, weil an den Bergflanken gewisse Abflüsse nicht modelliert wurden. Die Grössenfilterung bewirkt, dass vier kleinere Murkegel ihr zum Opfer fallen. Es sind dies die Kegel Vordermatt, Hinnnermatt, Egge und Überrotten.

Tabelle 5.9: Zur Klassifikation des Goms mittels DHM25 verwendete Werte

Parameter	Wert	Einheit
Neigung Seeds	5 - 10	Grad
Neigung Grenzwerte	5 - 25	Grad
Kurvatur	0 - 1.94	1/R
Abfluss-Untergrenze	1537	-
LRMSE	405.34	m
LRMSE_ref	327.25	m
Untergrenze Kegelgrösse	154	Pixel

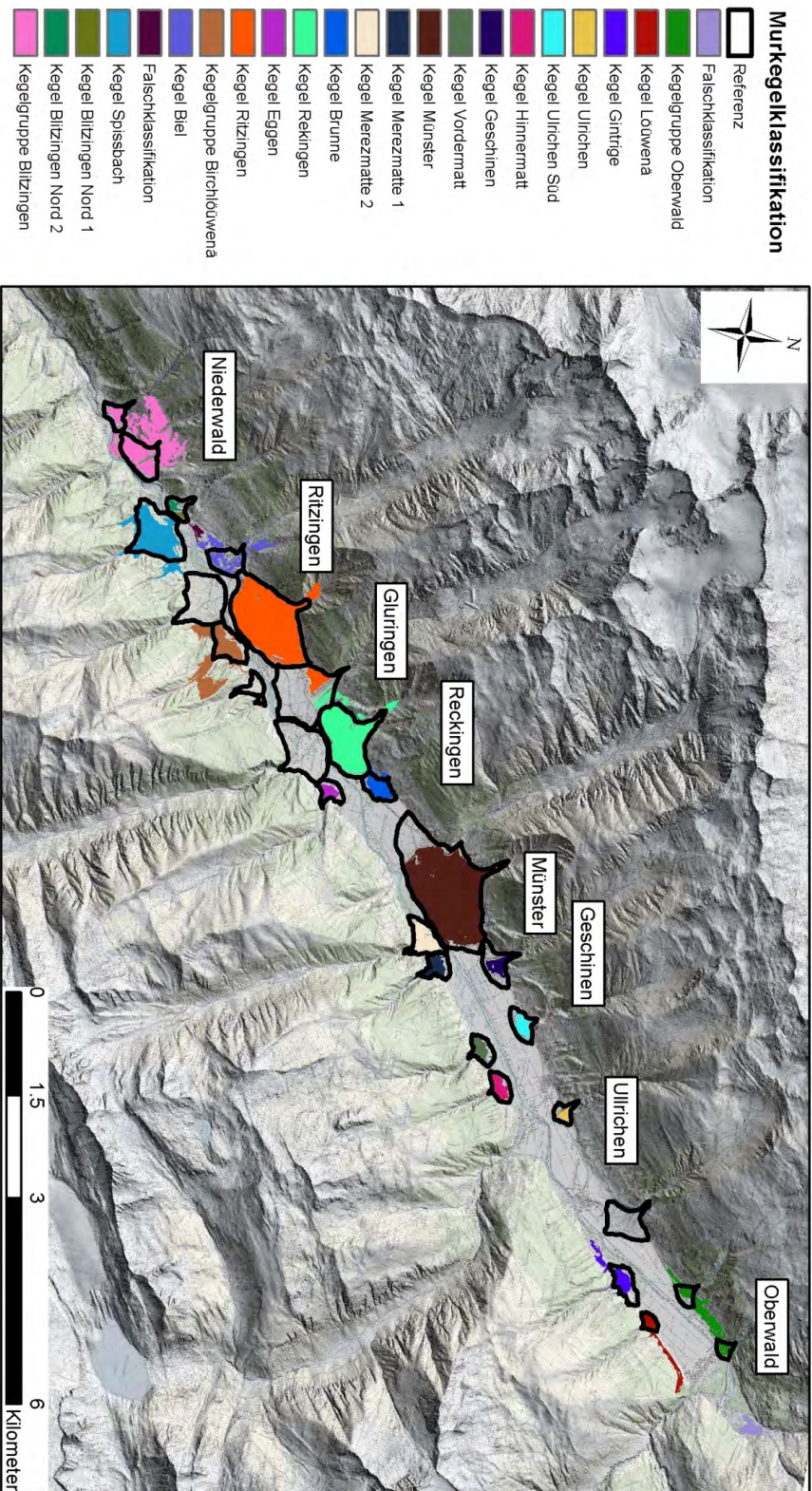


Abbildung 5.8: Klassifikation des Goms auf Basis des swissALTI3D. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 und swissALTI3D Hillshade von swisstopo.

5.4.2 Klassifikationsergebnisse unter Verwendung des DHM25

Nach Filterung der Gletscher resultiert auf Kegelebene folgendes:

- 11 Murkegel haben keinen Seedpixel erhalten (Niederwald, Bieliger Matte, Selkingen, Ritzingen, Gluringen, Riti, Riti klein, brunne, Riti b.O., Louwena, Oberwald)
- Von 27 Kegel wurden deren 21 extrahiert. Dies entspricht einer Sensitivität von 78%
- Insgesamt wurden sechs Kegelgruppen gebildet, wovon die grösste sechs Murkegel enthielt.
- Zwei Zonen wurden fälschlicherweise als Kegel klassiert. Es handelt sich dabei Bergflanken im Nordosten des Goms

Die Konfusionsmatrix in Tabelle 5.10 macht deutlich, dass die Klassierung mittels DHM25 für das Goms schlechter abgeschnitten hat, als diejenige mit dem höher aufgelösten swissALTI3D. Es fällt auf, dass viele Kegel zu Gruppen zusammengefasst wurden. Der tiefere PPV ist demzufolge aufgrund der Zonen, welche zwischen den Kegeln klassiert wurden und der Bergflanken in der Nähe von Ulrichen, welche ebenfalls fälschlicherweise als Murkegel klassiert wurden, gesunken. Im Vergleich zur Klassifikation mittels swissALTI3D fällt bei der Betrachtung der Abbildung 5.9 auf, dass beispielsweise die Kegelhäuse deutlich weniger genau gezeichnet und einige Pixel hinzugefügt wurden, welche schon zu den umliegenden Bergflanken gehören. Dies war bereits beim Mattertal und dessen Klassierung mittels DHM25 der Fall. Die Sensitivität ist etwas besser als dies bei der Klassierung mit dem swissALTI3D der Fall war. Wären die vier vorhin erwähnten Murkegel durch die Grössenfilterung nicht entfernt worden, würde die Klassierung womöglich insgesamt besser als die swissALTI3D-Klassierung abschneiden. So resultiert mit einem Kappa-Koeffizient-Wert von 0.57 eine etwas schlechtere Klassierung.

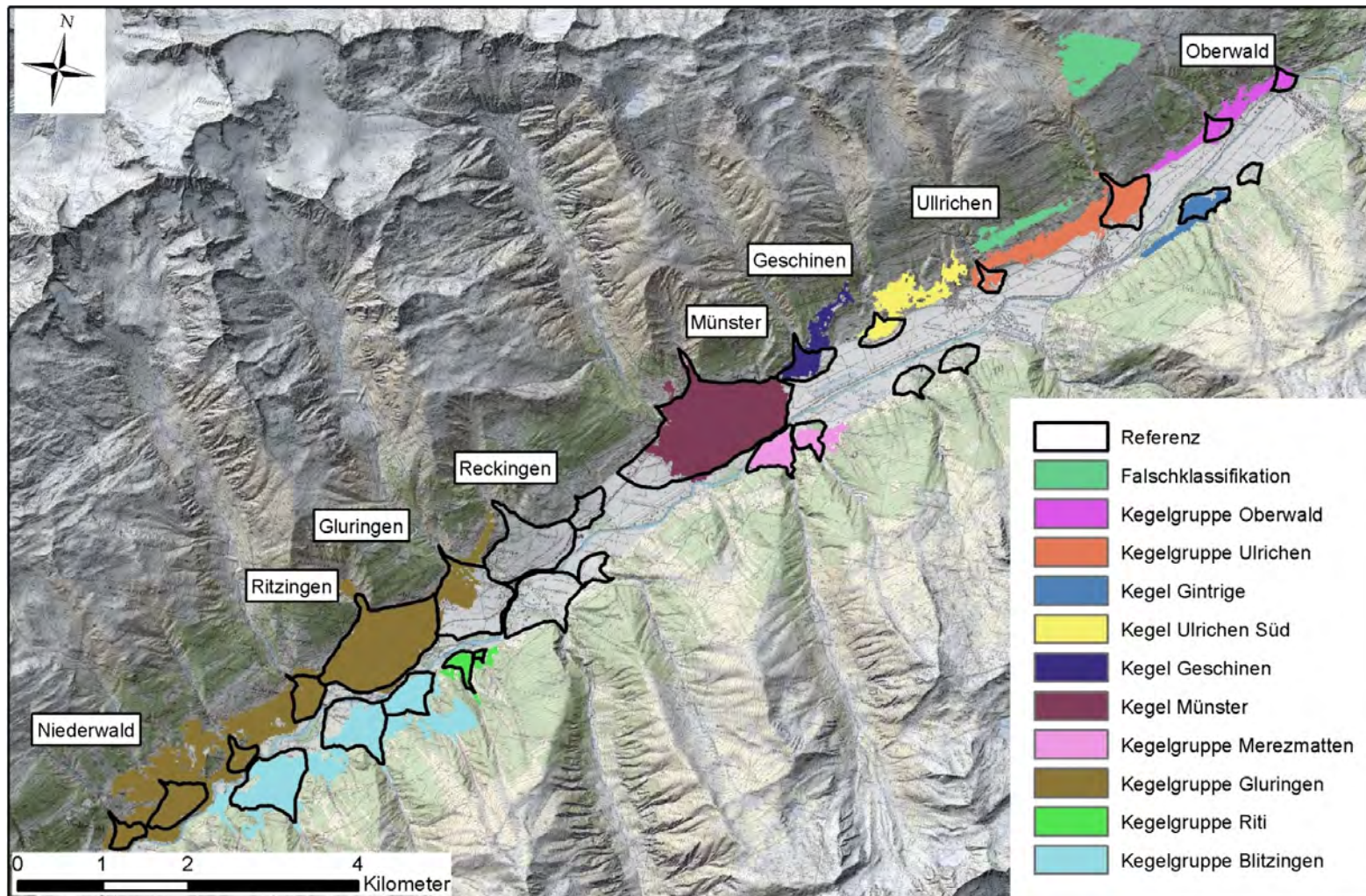


Abbildung 5.9: Klassifikation des Goms auf Basis des DHM25. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 und swissALTI3D Hillshade von swisstopo.

Tabelle 5.10: Konfusionsmatrix für die Klassifikation des Goms mittels DHM25

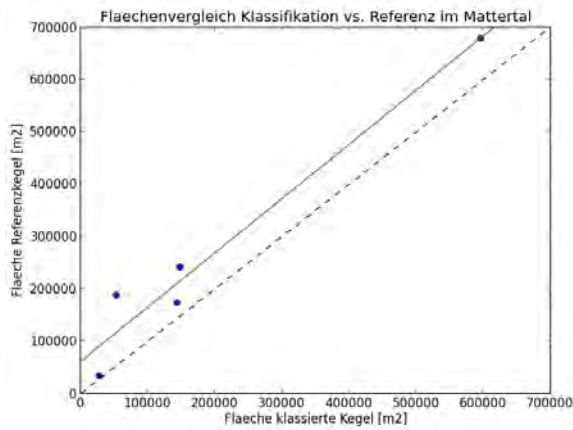
		Referenz			PPV [%]
		Kegel	Kein Kegel	Tot. Klassifikation	
Klassifikation	Kegel	7621	5990	13611	55.99
	Kein Kegel	4325	206451	210776	97.95
	Tot. Referenz	11946	212441	224387	
	Sensitivität [%]	63.80	97.18		95.40
Cohen's Kappa		0.57			

5.5 Neigungs- und Flächenwerte

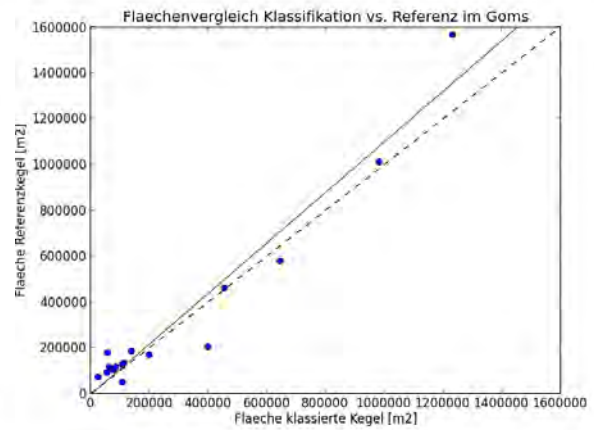
Die Resultate der Neigungs- und Flächenberechnungen gemäss der in Abschnitt 4.10 beschriebenen Formeln, sind in der nachfolgenden Tabelle 5.11 aufgelistet. Es wurden nur einzelne Kegel berücksichtigt. Kegelgruppen wurden wegen grosser Abweichungen insbesondere der Neigungswerte nicht in die Auswertung mit einbezogen. Aufgrund der besseren Klassifikationsergebnisse wurde nur das swissALTI3D als Basisdatensatz verwendet. Infolge der Variationen in der Genauigkeit der Kegelklassifikation je nach Gebiet und Kegel, können sowohl Neigung als auch Fläche eines Kegels erheblich von der Realität abweichen. Um eine Abschätzung machen zu können, wie stark die Abweichung von der Realität ist, wurden für die gleichen Kegel aus den Referenzdaten ebenfalls Neigung und Fläche pro Kegel gerechnet. Abbildung 5.10 stellt die Abweichungen für die Neigung und Fläche je Gebiet grafisch dar. Die schwarze, gestrichelte Linie stellt das 1 zu 1 Verhältnis dar, d.h. den Fall genauer Übereinstimmung zwischen Klassifikation und Referenz. Die grüne Linie entspricht der Regressionsgeraden der Punkteverteilung (Murkegel) Die geringe Anzahl Kegel im Mattertal lässt keine allgemeingültige Aussage zur Übereinstimmung der Flächen und Neigungen zwischen Klassifikation und Referenz zu. Evident ist, dass die Fläche der Kegel durch die Klassierung generell unterschätzt wird. Die Gesamtneigung wird ebenfalls eher unterschätzt. Für das Goms zeigt sich ein etwas anderes Bild ab. Die Flächenübereinstimmung ist erwartungsgemäss aufgrund der höheren Sensitivität etwas besser, während die Neigung der Kegel vorwiegend unterschätzt wird. Um mögliche Rückschlüsse auf Bildungsprozesse der Kegel zu erlauben und Unterschiede der Untersuchungsgebiete zu beschreiben, wird noch kurz auf die Verteilung der Neigungs- und

Tabelle 5.11: Flächen- und Neigungswerte der Murkegel für die Täler Mattertal und Goms, basierend auf dem swissALTI3D

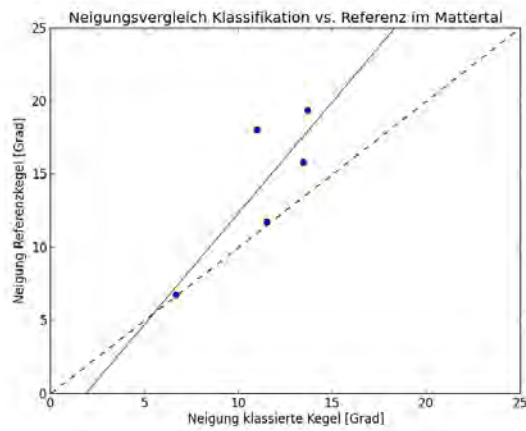
Gebiet	Murkegel	Fläche m^2	Neigung [°]
Mattertal	Täsch	53602.461	6.69
	Randa	595831.216	13.473
	Zen Achern	144133.141	13.7
	Ranft	27789.382	11.025
	Feld	148410.35	11.542
Goms	Louwenä	108818.487	4.697
	Gintrigen	115191.776	9.638
	Ulrichen	26472.315	9.184
	Wiler	62475.733	9.776
	Hinnermatt	78399.419	12.038
	Geschinen	58074.723	9.323
	Vordermatt	67968.853	7.956
	Münster	1234679.27	11.255
	Merezmatte	87096.343	12.197
	Merezmatte2	139481.605	10.262
	Brunne	108779.757	13.553
	Reckingen	647389.329	15.149
	Egge	55568.206	9.304
	Ritzingen	984319.461	14.273
	Birchlouwena	400806.056	17.181
	Selkingen (Biel)	200370.987	13.337
Lerch (Spiessbach)	457256.13	13.528	



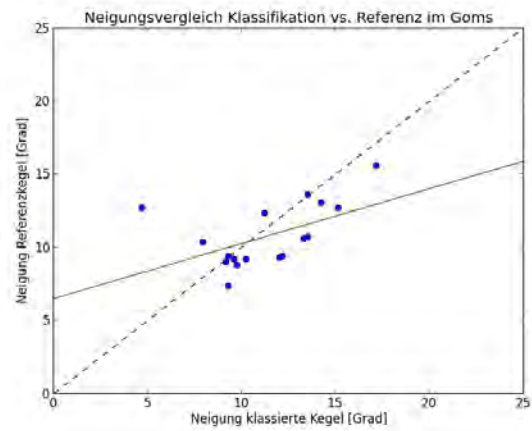
(a) Flächenvergleich Mattertal. $r^2 = 0.96$



(b) Flächenvergleich Goms. $r^2 = 0.94$



(c) Neigungsvergleich Mattertal. $r^2 = 0.70$



(d) Neigungsvergleich Goms. $r^2 = 0.27$

Abbildung 5.10: Abweichungen der Neigung und Fläche pro Kegel je Untersuchungsgebiet. Die schwarz gestrichelte Linie stellt die 1 zu 1 Gerade dar, die grüne entspricht der Regressionsgeraden.

Flächenwerte aller Murkegel, getrennt nach Gebiet, eingegangen. Es wurden jeweils die Referenzkegel verwendet, um die Verteilungen zu berechnen. Die Verteilungen sind in Abbildung 5.11 dargestellt. Abgesehen von den in Kapitel 3 unter Abschnitt 3.3 erwähnten,

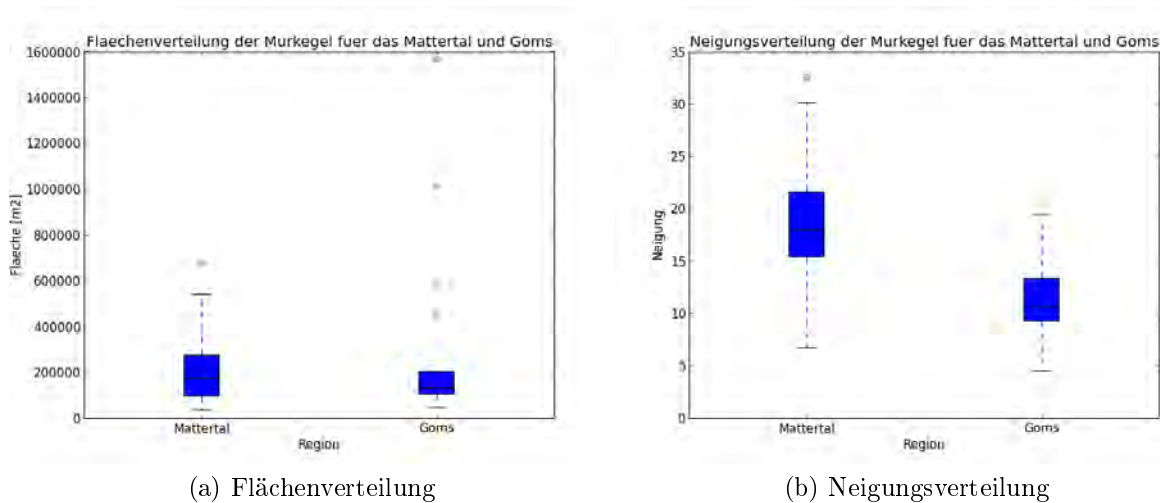


Abbildung 5.11: Verteilung der Neigungs- und Flächenwerte der Murkegel im Mattertal und Goms.

riesigen Kegeln, die wahrscheinlich auf grosse Sackungen zurück zu führen sind (BÖGLI, 1941), weist das Mattertal leicht grössere Murkegel auf. Deutlicher ist der Unterschied für die Neigung, welche für das Mattertal deutlich grösser ist, als diejenige der Murkegel im Goms. Auf die Resultate folgt nun deren Diskussion mit besonderem Augenmerk auf die Qualität und die Limiten der Klassifikation.

6 Diskussion

Die Evaluation der Klassifikation im Kapitel 5 hat einige interessante Aspekte ans Tageslicht gebracht. Die Kombination der gewählten *land-surface parameter* scheint gewisse morphologische Eigenschaften der Murkegel gut zu beschreiben, jedoch vermag sie nicht die gesamte Bandbreite der Kegelformen und Ablagerungsprozesse zu erfassen. Vielleicht nicht ganz erwartungsgemäss, liefern die beiden verwendeten Datensätze ähnliche Klassifikationsresultate, obwohl sie sich in ihrer Auflösung und Genauigkeit unterscheiden. In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse im Kontext der im Kapitel 1 formulierten Forschungsfragen und -Ziele diskutiert werden. Dabei wird jede Forschungsfrage in einem separaten Abschnitt behandelt.

6.1 Extraktion der Murkegel mittels hoch aufgelöstem DHM im alpinen Raum

1. Forschungsfrage: Inwieweit und wie genau lassen sich Murkegel mittels automatischer Klassifikation aus dem hoch aufgelösten digitalen Höhenmodell swissALTI3D extrahieren?

Die Resultate haben gezeigt, dass mit der verwendeten Methodik und dem swissALTI3D als Basisdatensatz gemäss der Werte des Kappa-Koeffizienten (0.61 für das Matternal und 0.65 für das Goms) nach LANDIS & KOCH (1977) in: FIELDING & BELL (1997) eine gute Klassifikation erreicht wird. Es zeichnet sich auch ab, dass der positive prädiktive Wert (PPV) durchwegs höher liegt als die Sensitivität. Für die getesteten Gebiete werden im Mittel etwas mehr als die Hälfte aller kartierten Murkegel extrahiert (Sensitivität). Die Verlässlichkeit der Klassierung ist einiges besser, da von den klassierten Murkegeln etwa 82% auch wirklich Murkegel sind. Viel mehr interessiert aber die Frage, weshalb die verwendete Methodik eine gute Übereinstimmung der klassierten

Gebiete zu den Murkegeln liefert, beziehungsweise weshalb die Übereinstimmung nicht besser ist und welche Aspekte nicht berücksichtigt wurden. Gemäss FIELDING & BELL (1997) können Faktoren, die zu Klassierungsfehlern führen, in zwei Kategorien eingeteilt werden: Limitationen des Algorithmus und unvollständiger Einbezug der Prozesse ins Klassierungsmodell. Im Kontext dieser Arbeit beruhen die Klassifikationsfehler einerseits auf methodischen, andererseits auf prozessbezogenen Limiten. Teilweise kann man die Limiten der Klassifikation klar zur einen oder anderen Kategorie zuweisen, meist sind sie jedoch verwoben. Im folgenden Abschnitt wird auf die Limiten der Klassifikation eingegangen.

6.1.1 Methodische und Prozess-bedingte Limiten der Klassifikation

Definition der Murkegel

Die erste Schwierigkeit in der Beantwortung der ersten Forschungsfrage liegt in der Definition des Begriffs «Murkegel». Wie in Abschnitt 2.1 bereits erwähnt, ist in der Literatur eine Vielzahl an Definitionen von Murkegeln zu finden. In der vorliegenden Arbeit wurden Murkegel insbesondere anhand der lokalen Neigung und ihrer konvexen Form im Querprofil beschrieben, im Wissen, dass Ablagerungskegel meist durch eine Vielzahl von Ablagerungsprozessen gebildet wurden, wobei der Murgang nur einer davon ist. Die Neigung erlaubt eine grobe Unterscheidung zwischen verschiedenen Ablagerungsprozessen. So sind durch Sturzprozesse entstandene Ablagerungskegel beispielsweise steiler als durch fluviale Prozesse gebildete Kegel (LOUIS, 1968). Eine Unterscheidung eines Sturzkegels von einem Murkegel ist in Abbildung 6.1 ersichtlich. Sie zeigt beide Kegelarten in der Gegend von Randa. Westlich des Dorfes ist ein grosser Ablagerungskegel eines Bergsturzes ersichtlich (GRAF ET AL., 2011), welcher nicht als Murkegel klassifiziert wurde, obwohl er eine kegelförmige Oberfläche aufweist. Der Murkegel von Randa hingegen ist als solcher klassiert worden. Die Unterscheidung wurde einerseits durch die Neigung und andererseits durch das Fehlen eines modellierten Abflusses auf dem Sturzkegel möglich. Eine feinere Unterscheidung der kegelbildenden Prozesse fliesst in der hier verwendeten Definition der Murkegel nicht mit ein. Es kann durchaus sein, dass auch Kegel extrahiert werden, die hauptsächlich durch Überschwemmungen entstanden sind und somit eher Schwemm- als Murkegel sind. Der verwendete Algorithmus vermag also kegelförmige Ablagerungs-

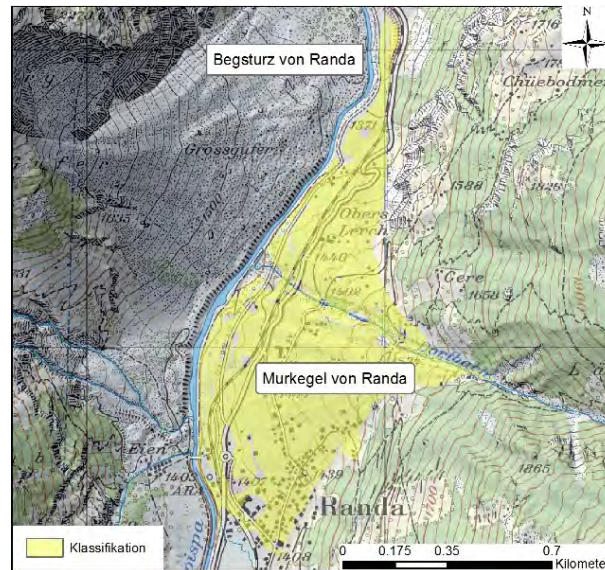


Abbildung 6.1: Unterscheidung eines Sturzkegels von einem Murkegel. Die gelbliche Fläche stellt die Klassifikation des Murkegels dar. Verwendete Daten: Digitale Pixelkarte 1:25000 und swissALTI3D Hillshade von swisstopo.

formen zu erkennen und zu extrahieren und stark unterschiedliche Ablagerungsprozesse über die Neigung zu differenzieren, jedoch ist eine gezielte Erkennung und Beschreibung der verschiedenen an dem Aufbau des Kegels beteiligten Prozessen anhand der gewählten Methodik nicht möglich. Dies ist so, weil die Datengrundlage (das DHM) eine Beschreibung der Oberfläche darstellt, jedoch keine Einsicht in tiefere Schichten gewährt wird. Ableitungen und statistische Untersuchungen der Oberfläche erlauben die Beschreibung der Struktur und Textur der Fläche und somit unter Umständen Rückschlüsse auf den aktuellsten Bildungsprozess. Stratigraphische oder dendrochronologische Daten erlaubten zusätzlich Einblicke in die Entwicklungsgeschichte des Kegels (BENZ, 1998).

Talneigung und Talbreite

Die besseren Klassifikationsresultate im Goms im Vergleich zum Mattertal deuten darauf hin, dass die Morphologie des Tales einen Einfluss auf die Güte der Klassifikation hat. Das Mattertal mit seinen steilen Flanken, seinen beachtlichen Höhendifferenzen zwischen Talboden und Gipfel, sowie die enge Talsohle, unterscheidet sich deutlich von den Tälern des Goms und Val Müstair mit ihren breiten Talböden. Dieser Faktor hat einen Einfluss auf die Kegelneigung und somit auch auf die Effektivität des Algorithmus, Murkegel zu

extrahieren. Im Val Müstair wurden Seedpixel für einen Neigungsbereich von fünf bis zehn Grad definiert. Dieser Wertebereich sollte sicherstellen, dass die Seedpixel an der Basis des Kegels zu liegen kommen. Es überrascht nicht, dass dieser Ansatz im Val Müstair gute Ergebnisse liefert, insofern als auf jedem Murkegel ein Seedpixel zu liegen kommt. Im Goms weisen 24 der 27 Murkegel mindestens einen Seedpixel auf, einer davon wird aber aufgrund einer zu kleinen Grösse herausgefiltert. Von den vier Murkegeln die nicht klassiert werden, ist ein Fall darauf zurück zu führen, dass der Neigungsintervall von fünf bis zehn Grad zu klein und zu tief angesetzt war. Im Mattertal hingegen sind es sechs von acht Kegeln, die aufgrund zu grosser Neigung keine Seedpixel zugewiesen erhalten. Die Definition der Seedpixel über die Neigung bewirkt also, dass die erfolgreiche Klassierung von Murkegeln direkt von der lokalen Neigung an ihrer Basis und indirekt auch von der Gesamtneigung abhängt. Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, hat die Talbreite einen erheblichen Einfluss auf die Kegelform. Durch die Enge des Tales entstehen im Mattertal also gezwungenermassen stärker geneigte Murkegel, welche aufgrund der Seedpixeldefinition schlechter extrahiert werden. Dies scheint auch der Neigungsvergleich zwischen den Murkegeln aus dem Mattertal und denjenigen des Goms zu zeigen (siehe Abschnitt 5.5). In ihrer umfassenden Untersuchung der Murgänge während des Hochwassersommers 1987, stellten RICKENMANN & ZIMMERMANN (1993) einen Zusammenhang zwischen Kegelneigung und Magnitude der Murgangereignisse fest, welcher besagt, dass flache Murkegel auf grosse Ereignisse zurück zu führen sind. Daraus könnte man ableiten, dass die Kegel im Mattertal deshalb flach sind, weil nur kleine Murgänge zu Tal gehen und im Vergleich dazu im Goms aufgrund der flacheren Kegel grössere Ereignisse stattfinden. Allerdings spielt im durch RICKENMANN & ZIMMERMANN (1993) beschriebenen Zusammenhang auch die Gerinnelänge vom Einzugsgebiet bis zum Kegelfuss eine Rolle. Hinzu kommt, dass die meisten Murkegel des Mattertals grösser sind, als diejenigen des Goms, was auch als Hinweis auf grössere Murgangvolumina interpretiert werden kann (SCHEIDL ET AL., 2008; SCHEIDL & RICKENMANN, 2010). Tatsächlich ist schon beobachtet worden, dass sehr grosse Geschiebevolumina durch einzelne Murgänge im Mattertal verfrachtet worden sind (GRAF ET AL., 2011). Es scheint also eher, dass die Murkegelneigungen auf die Talenge zurückzuführen sind. Aus den morphologischen Unterschieden (Talbreite, Kegelneigungen) und den Klassifikationsergebnissen lässt sich demzufolge schliessen, dass die Extraktion der Murkegel mittels der in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Methode von der Talbreite und der Neigung abhängig ist und für breitere Täler - oder solchen, die

zwar enge aber schwach geneigte Talböden aufweisen - zuverlässigere Resultate liefert als für schmale, steile Täler. Dies scheint nicht nur für ganze Täler zu gelten. Die westliche Seite des Mattertals ist durch das Fallen der Gesteinsformationen deutlich steiler als die von Sackungen geprägte Ostflanke (DIKAU ET AL., 1996). Betrachtet man die Klassifikation des Mattertals, so fällt auf, dass sechs der acht nicht klassierten Kegel auf der steileren Westseite liegen. Von sechs Kegeln (siehe Abschnitt 5.1.3), die keine Seedpixel erhalten haben, liegen deren vier auf der Westseite. Um sicher zu gehen, dass nicht einfach ein grösseres Neigungsintervall für die Seedpixel das Problem mit der Talbreite und Neigung lösen kann, wurden Neigungsintervalle von 5-15 bzw. 5-25 Grad für die Seedpixel verwendet und danach mit diesen gerechnet. Die Murkegel des Mattertals wurden dabei tatsächlich besser extrahiert, jedoch sank der PPV der Klassierungen für das Goms und Val Müstair aufgrund von schlecht platzierten Pixeln, die als Folge der grosszügigen Neigungsdefinition entstanden, massiv. Je nach Wahl des Neigungsintervalls fällt die Sensitivität zu Gunsten des PPV oder umgekehrt. Deshalb zeichnet sich ab, dass eine Definition der Neigungsintervalle für die Seedpixel gebietsabhängig geschehen muss.

Gerinneverlauf

Im Kapitel 4 wird unter Abschnitt 4.6.3 erwähnt, dass die Plankurvatur verwendet wurde, um die Krümmung der Oberfläche zu beschreiben, auf welcher das Gerinne verläuft. Im Idealfall verläuft das Gerinne mittig auf dem Kegel und kann somit sehr gut von einem Gerinne, welches beispielsweise in einem Kerbtal verläuft, unterschieden werden, da die Oberflächenmodellierung eines Kerbtals eine stark konkave Form zeichnen würde, während die Oberfläche eines Kegels in der Kegelmittle konvex modelliert würde. Verläuft das Gerinne aber seitlich des Kegels, so besteht die Möglichkeit, dass die Modellierung der Oberfläche durch die an den Kegelseiten grenzenden Bergflanken beeinflusst wird und die Oberfläche, auf der das Gerinne verläuft, konkav modelliert wird, obwohl sie konvex ist oder aber, dass das Gerinne tatsächlich am Kegelrand entlang verläuft, wo die Oberfläche konkav ist. Die Abbildung 6.2 veranschaulicht dies anhand eines Kegels im Goms südlich von Gluringen. Das Gerinne verläuft östlich entlang des Kegelrands. Die grüne Fläche stellt die Flächen dar, welche Krümmungswerte zwischen 0 und 1.93 aufweisen und somit eine ebene bis konvexe Oberfläche darstellen. Die blaue Linie stellt das modellierte Gerinne dar, die schwarze repräsentiert den Kegelumriss. Es ist klar ersichtlich, dass der grösste Teil des Gerinnes nicht auf einer in der xy-Ebene konvexen Oberfläche verläuft. Nur ein kleiner

Teil des Gerinnes am Kegelfuss streift konvexes Gebiet. Da die Neigung aber in diesem Fall nicht der Vorgabe für die Seedpixel entspricht, wird kein Seedpixel gesetzt. Die Limite auf Seite des Algorithmus besteht in der Tatsache, dass eine Extraktion der Murkegel nur zuverlässig geschieht, wenn das Gerinne nicht zu nah am Kegelrand verläuft. Zusätzlich handelt es sich beim beschriebenen Sachverhalt auch um eine prozess-bedingte Limite. Üblicherweise baut sich ein Murkegel durch seitliche Ablagerungen kontinuierlich auf. Im Anfangsstadium verläuft das Gerinne deshalb in der Mitte (GAMMA, 2000). Bei grösseren Murgangereignissen oder wenn ein älterer Murgang in der Rinne Material ablagert und das Gerinne verstopft, kommt es aber oft zu Richtungsänderungen des Gerinneverlaufs (GAMMA, 2000). Dieser Vorgang kann sich über längere Zeit öfters wiederholen. Verläuft das Gerinne nach einer solchen Richtungsänderung am Rande des Kegels, scheitert die in der vorliegenden Arbeit verwendete Methode zur Murkegelklassierung, weil sie den Prozess nicht abbilden kann. Der Gerinneverlauf auf dem Kegel beeinflusst die Sensitivität, hat aber keine Auswirkungen auf den PPV.

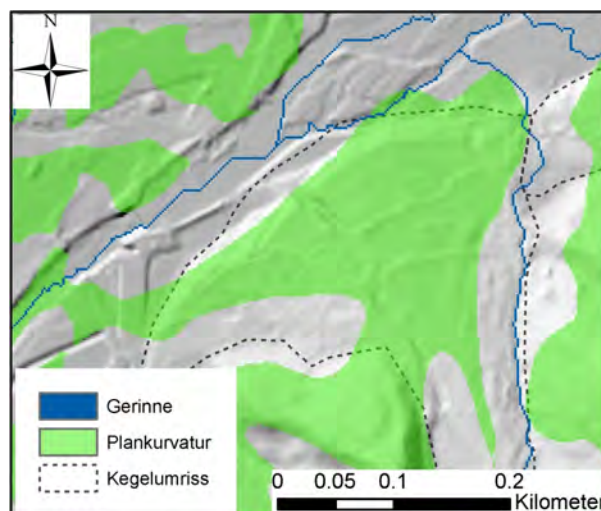


Abbildung 6.2: Seitlich verlaufendes Gerinne auf einem Murkegel südlich von Gluringen, Goms. Das Gerinne (blau) verläuft am Kegelrand und schneidet die Flächen mit positiver Kurvatur (grün) über grosse Strecken nicht, wodurch keine Seedpixel extrahiert werden können. Verwendete Daten: swissAL-TI3D Hillshade von swisstopo.

Eintiefung des Gerinnes und Schutzbauten

Ähnlich wie der Verlauf des Gerinnes hat auch die Eintiefung des Gerinnes eine Auswirkung auf die Effektivität des Algorithmus, den jeweiligen Murkegel zu extrahieren. Insbesondere nach grossen Murgangereignissen, die das Gerinnebett stark erodieren oder wenn der Kegel schon längere Zeit nicht mehr aktiv war und sich der Abfluss in das Bett eintieft, können grosse Höhenunterschiede zwischen Gerinnebett und Kegeloberfläche entstehen. Diese können bewirken, dass die Neigung und auch die Plankurvatur, obwohl beide stark geglättet, Werte annehmen, die nicht im Definitionsbereich der Seedpixel liegen, womit der Kegel nicht erkannt wird. Was die Neigung betrifft, ist es sogar so, dass selbst wenn im Gerinne ein Seedpixel zu liegen kommt, der Neigungsunterschied zum Nachbapixel so gross sein kann, dass das Ähnlichkeitskriterium nicht erfüllt oder sogar der Neigungsschwellenwert überschritten werden. Dieses Problem wird teilweise dadurch verschärft, dass auf vielen Kegeln, insbesondere im Mattertal grosse Schutzbauten angebracht sind. Meistens handelt es sich um Geschiebefänger oder Ablenkdämme die am Kegelhals, entlang des Gerinnes oder zum Schutz des Hauptflusses vor Übermürung am Kegelfuss konstruiert worden sind. Ein Paradebeispiel ist der Kegel von Wildi im Mattertal. Er wurde durch den Algorithmus aus zwei Gründen nicht erkannt. Einerseits ist dies der riesige Geschiebesammler am Kegelfuss, der nach einem Wassertaschenausbruch und dem daraus resultierenden grossen Murgangereignis vorsorglich gebaut wurde (GRAF ET AL., 2011). Das Gerinne weist dort zwar eine Neigung zwischen fünf und zehn Grad auf und wäre somit für Seedpixel prädestiniert aber die hohen Schutzwälle gepaart mit der Breite des Sammlers sorgen dafür, dass die Oberfläche trotz der starken Glättung mittels einer Nachbarschaft von 51 x 51 Zellen innerhalb des Sammler als konkav modelliert wird, während sie für das restliche Gerinne fast ausschliesslich konvex ist. Der zweite Grund ist die grosse Neigung entlang des Gerinnes. Dieses ist wahrscheinlich auf die starke Eintiefung zurück zu führen. Gemäss GRAF ET AL. (2011) hat es schon seit Anfang der 80er-Jahren keine grösseren Murgänge mehr im Wildibach gegeben, die den Kegel erreicht hätten. Die meisten Murgänge bleiben gemäss den Autoren im Transitbereich, der Schluchtstrecke oberhalb des Kegels stecken. Diese Aussage unterstützt die Annahme, dass der Wildibach sich auf dem Kegel in dieser Zeit eintiefen konnte. Die Eintiefung des Gerinnes ist eine prozess-bedingte Limite die aber vor allem aufgrund der hohen Auflösung der Daten und der Definition der Seedpixel zum Tragen kommt. Die

Schutzbauten sind nicht natürlichen Ursprungs, können aber als direkte Folge von natürlichen Prozessen (Murgängen) betrachtet werden und sind deshalb auch prozess-bedingt. Wiederum gilt aber, dass eine hohe vertikale und horizontale Auflösung des DHM die Darstellung dieser Schutzbauten erst ermöglicht. Sowohl eine grosse Eintiefung als auch Schutzbauten verringern die Sensitivität beträchtlich. Die Eintiefung und Schutzbauten auf dem Kegel von Wildi, der dadurch gar nicht klassiert wurde, stellen einen schönen aber zugegebenermassen extremen Fall dar. Meist wirken sich insbesondere Schutzbauten insofern auf die Sensitivität aus, als die Bauwerke selber und Pixel in unmittelbarer Nähe nicht klassiert werden, da der Neigungsunterschied so gross ist, dass das Ähnlichkeitskriterium nicht erfüllt wird. Da sich sowohl eingetieft Gerinne als auch Schutzbauten auf dem Kegel befinden, haben sie keine grosse Auswirkung auf den PPV.

Modellierung der Abflussakkumulation

Eine methodische Limite der Klassifikation stellt die Genauigkeit der Modellierung der Abflussakkumulation und somit des Flussnetzwerks dar. Es wurde schon angedeutet, dass aufgrund der Verschneidung der einzelnen Seedpixel-Faktoren, der linearen Form und der daraus folgenden geringeren Flächenausdehnung die Abflussakkumulation eine besonders wichtige Rolle in der Murkegelklassifikation einnimmt. Im Gegensatz zu den bis anhin genannten Faktoren, beeinflusst die Abflussakkumulation neben der Sensitivität vor allem den PPV beträchtlich. Die Gütemasse $LRMSE$ und $LRMSE_{ref}$ deuten auf eine schlechte Übereinstimmung der Modellierung des Abflusses und des realen Flussnetzwerks. Räumlich betrachtet ist die Abweichung vorwiegend in höheren Lagen gross, wo die Akkumulation des Abflusses noch gering ist, beziehungsweise in Gebieten, wo Bergbäche ihrer Quelle entspringen und insbesondere in Gletschergebieten. Wo kein Abfluss modelliert wird, können keine Murkegel extrahiert werden. Dies wirkt sich auf die Sensitivität aus. Im Mattertal ist ein Kegel davon betroffen, im Goms sind es deren zwei. In allen Fällen handelt es sich um kleine Kegele, die von kleineren Gebieten mit kleinen Einzugsgebieten gebildet wurden. Dies lässt den Schluss zu, dass der Schwellenwert für die Abflussakkumulation zu hoch gewählt wurde, um kleinere Abflusszweige zu modellieren. Die Suche nach einem geeigneten Schwellenwert für die durch die D8-Methode generierte Abflussakkumulation stellt seit jeher ein Problem dar, zu welchem es zwar Lösungsansätze gibt, die aber alle entscheidende Nachteile haben (GRUBER & PECKHAM, 2009). Der in dieser Arbeit gewählte Ansatz, den Schwellenwert durch statistische Masse zu beschrei-

ben hat den Nachteil, dass er von der Grösse des beobachteten Gebiets abhängt. Wird der Abfluss für ein Gebiet der Grösse der Schweiz modelliert, liegt der Schwellenwert eines 40%-Quantils beispielsweise höher, als wenn nur ein Tal wie das Goms oder Mattertal als Untersuchungsgebiet dient. Da kleinere Gebiete nicht modelliert werden, könnte man versucht sein, den Schwellenwert einfach tiefer zu wählen. Dadurch steigt zwar die Sensitivität aber auch die Gefahr, dass zusätzlich überflüssige Flusszweige modelliert werden, wodurch der PPV sinkt. Eine optimale, allgemeingültige Lösung für dieses Problem wurde in dieser Arbeit nicht gefunden. Da die Kegel, welche durch einen zu hohen Schwellenwert betroffen sind, meistens einen kleinen Teil der Gesamtfläche aller Kegel ausmachen, wurde lieber in Kauf genommen, dass die Sensitivität sinkt und der PPV dafür hoch bleibt.

Ein spezielles Phänomen, welches erst durch die Modellierung der Abflussakkumulation des Mattertals entdeckt wurde, ist die Abflussmodellierung auf Gletschergebiet. Wo normalerweise der Gletscher verläuft, wurden plötzlich Abflüsse modelliert. Kam eines dieser Abflusspixel auf einer Fläche, welche sowohl den Plankurvatur- als auch den Neigungskriterien entsprach, wurde es als Seedpixel markiert. Da Gletscher für einen Grossteil ihrer Fläche die gleichen Neigungsgrenzwerte wie Murkegel und gleichzeitig bis auf die Gletscherspalten ebenfalls sehr homogene Flächen aufweisen, breiteten sich die Regionen von den Seedpixeln meist auf einen Grossteil der Gletscheroberfläche aus und wurden als Murkegel klassiert. Die verwendete Methodik kann gemäss der implementierten Murkegeldefinition also nicht zwischen Gletschern und Murkegeln unterscheiden. Ohne Filterung dieser Gletscher sank der PPV dadurch sehr stark ab. Streng gesehen ist die Modellierung von Abfluss in Form eines Gerinnes falsch, aber es leuchtet ein, dass eine Art von Abfluss über dem Gletscherbett stattfinden muss. Salopp gesagt, wurde der Abfluss einfach im falschen Aggregatzustand modelliert.

Kegelgrenzen

Kegelgrenzen, insbesondere der Kegelfuss, stellen eine weitere Schwierigkeit in der Extraktion dar. Es besteht sowohl in der Realität als auch in der Modellierung eine gewisse Unsicherheit, was den Verlauf der Kegelgrenzen betrifft. In relativ steilen, engen Tälern wie dem Mattertal werden die Kegel teilweise direkt durch den Hauptfluss, die Matter Vispa begrenzt. Solche klar definierten Grenzen sind einfach mittels *region-growing* Algorithmus zu erkennen, da sie durch eine klare Neigungsänderung charakterisiert sind. Kegel, welche stärker durch periodische Überschwemmungen und fluvialen Transport als durch

Murgänge geprägt sind, weisen durch den ständigen Abtransport des Materials oft einen kontinuierlichen Übergang zum Talboden auf, welcher durch ein sehr kleines Neigungsverhältnis zwischen Kegelfuss und Ebene charakterisiert wird (HASHIMOTO ET AL., 2008). Aktive Murkegel hingegen zeigen einen deutlicheren Übergang von Kegelfuss zu Ebene, da die Ablagerung des Murmaterials plötzlich geschieht, sobald eine gewisse Neigung unterschritten wird (GAMMA, 2000). Den Kegelfuss Ersterer zu begrenzen ist mittels der verwendeten Methodik nicht möglich, zumal auch in natura keine klare Grenze ersichtlich oder definiert ist. Murkegel, die durch sehr viskose Murgänge geprägt sind und deshalb eine grosse Neigung und einen abrupten Übergang aufweisen (WHIPPLE, 1994), besitzen einen relativ klar definierten Kegelfuss mit deutlicher Neigungsänderung. Diese wird durch das Ähnlichkeitskriterium erkannt. Die seitlichen Kegelränder sind oft klar durch Neigungsänderungen erkennbar, und werden deshalb meist sehr genau klassiert. Jedoch kommt es vor, dass beispielsweise Strassen quer durch den Kegel entlang einer Bergflanke verlaufen. Die Planierung der Oberfläche bewirkt, dass der ganze Strassenabschnitt, welcher sich innerhalb der Neigungsgrenzen befindet als Murkegel klassiert wird. Ähnlich verhält es sich mit dem Gelände, welches links und rechts entlang der Strasse verläuft.

Zusammenfassung der Limiten

Die limitierenden prozess- und methodenbedingten Faktoren der Klassifikation werden hier noch einmal zusammenfassend aufgelistet:

- Die Definition des Murkegels, welche im *region-growing* Algorithmus implementiert wird, hat entscheidenden Einfluss auf die Erkennung der Murkegel. In dieser Arbeit ist der Begriff Murkegel sehr offen definiert als Ablagerungskegel, welcher nicht durch Sturzprozesse entstanden ist. Hierbei handelt es sich um eine methodische Limite der Implementierung und des Datensatzes, andererseits aber auch um eine prozessbedingte Limite, da die formbildenden Prozesse nicht immer Spuren hinterlassen.
- Die Morphologie des Tales, insbesondere die Neigung der Bergflanken und Breite des Tales limitieren die Klassifikationsgenauigkeit. Breite Talböden und nicht zu steile Flanken führen zu guten Klassifikationsergebnissen, sofern die Neigung der Bergflanken sich genügend von der Kegelneigung unterscheidet. Enge, steile Täler erschweren die Klassifikation und führen zu einer tieferen Sensitivität.

- Am seitlichen Kegelrand oder in dessen Nähe verlaufende Gerinne erschweren die Extraktion eines Murkegels, da die Oberfläche, auf welcher sich das Gerinne befindet, im Querprofil nicht mehr konvex sondern konkav ist oder modelliert wird. Diese methodische Limitierung wird hervorgerufen, wenn das Gerinne seinen Verlauf über die Zeit verändert. Es handelt sich also auch um eine prozess-bedingte Limitierung, welche sich auf die Sensitivität auswirkt.
- Durch Inaktivität oder häufige, grössere Murgangereignisse eingetiefte Gerinne sowie Schutzbauten erschweren die Extraktion der Murkegel. Beide Faktoren sind prozess-bedingt. Allerdings fallen sie nur deshalb ins Gewicht, weil die hohe Auflösung der Daten die Erkennung der Gerinne und Schutzbauten erlaubt. Auch durch diese Limite leidet primär die Sensitivität der Klassierung.
- Die Modellierung des Abflusses stellt einen methodischen Schwachpunkt dar und limitiert die Klassifikation auf zwei Arten. Einerseits führt das Unterlassen gewisser Flussverzweigungen zur Nicht-Klassifikation der Kegel, was sich auf die Sensitivität auswirkt. Andererseits führen fälschlich modellierte Verzweigungen zur Klassifikation von falschen Gebieten (insbesondere von Gletschern), was den PPV beeinflusst.
- Die Abtragungsprozesse, welche für einen kontinuierlichen Übergang der Neigung zwischen dem Kegelfuss eines Schwemmkegels und dem Tal sorgen, limitieren die Fähigkeit zur Begrenzung der Murkegel. Insbesondere der Kegelfuss von Schwemmkegeln oder derjenige von schwach-viskosen Murgängen dominierter Murkegel wird nicht genau klassiert. Diese prozess-bedingte Limitierung erschwert auch die Definition des Kegelfusses in der Realität.

6.1.2 Vergleich zum Ansatz von Miliareisis und Argialas

Um die Forschungsfrage abschliessend behandeln zu können, soll an dieser Stelle noch ein Vergleich zum Klassifikationsansatz von MILIARESIS & ARGIALAS (2000) vollzogen werden. In ihrer Studie erzielten die Autoren für Schwemmkegel in der ariden Umgebung des Death Valley eine sehr gute Klassifikation. Um zuverlässig den Kegelfuss zu extrahieren, verwendeten die Autoren Fernerkundungsdaten. Der Talboden und dessen Salzablagerungen unterschieden sich spektral stark von dem auf den Kegeln abgelagerten Material. Die Seedpixel definierten sie einzig über die Abflussakkumulation, indem sie dieses durch

verschiedene Algorithmen so bearbeiteten, bis nur noch das unterste Pixel übrig blieb, welches an flaches Gelände angrenzte. Die Schwemmkegel liessen sie dann mittels *region-growing* und Neigungsgrenzwerten zwischen zwei und sieben Grad wachsen. Die Autoren erwähnen, dass ihre Methode gut funktioniert, falls gewisse Punkte erfüllt werden. Einerseits muss ein arides Setting vorliegen, welches die spektrale Unterscheidung zwischen Talboden und Kegelfuss erlaubt. Weiter müssen die Kegel aus schluchtartigen, engen Tälern in eine grosse Ebene auslaufen. Die Seedpixeldefinition von MILIARETIS & ARGIALAS (2000) ist sehr robust aber die Autoren erwähnen in ihrem Paper nicht, welche Grenzwerte sie für die Abflussakkumulation benutzt haben. Des Weiteren haben sie den Algorithmus nur in einem Testgebiet überprüft, in welchem sie die Trainingsdaten erhoben hatten. Ihr Testgebiet entspricht von der Form her den in dieser Arbeit beschriebenen breiten Tälern mit klarem Übergang der Bergflanken zum Talboden. Der in dieser Arbeit implementierte Ansatz zur Seedpixelextraktion ist im Vergleich relativ sensitiv auf Grenzwertänderungen der Input-Parameter. Allerdings liess sich MILIARETIS & ARGIALAS (2000) Ansatz nicht zuverlässig auf die Testgebiete in den Alpen übertragen. Aufgrund der hohen Auflösung des swissALTI3D und trotz der starken Neigungsglättung kamen viele Seedpixel von Endsegmenten nicht am Kegelfuss zu liegen, sondern flossen den Hauptfluss hinab bis zu dessen Mündung in einen See. Der Hauptgrund liegt darin, dass sowohl das Mattertal als auch das Val Müstair und selbst das Goms eine grössere pauschale Neigung aufweisen, als die grossen Ebenen des Death Valley, welche «topfeben» sind. Es hat sich auch gezeigt, dass die einfache Verwendung eines unteren und oberen Grenzwerts für die Kegeldefinition oft nicht genügt, um die Kegel von den umliegenden Gebieten abzugrenzen. Dies ist primär aufgrund der Neigungsunterschiede zwischen den Schwemmkegeln im ariden Death Valley und den Murkegeln in den Alpentälern zurück zu führen. Während der von MILIARETIS & ARGIALAS (2000) definierte Grenzwert von zwei bis sieben Grad ein relativ kleines Neigungsintervall darstellt, sind die in dieser Arbeit definierten fünf bis 25 Grad zu gross, um zuverlässig zwischen beispielsweise einer flachen Bergflanke und dem angrenzenden Kegelfuss zu unterscheiden. Deshalb wurde das Neigungsverhältnis als Ähnlichkeitskriterium eingeführt. Ein letzter Punkt ist die spektrale Unterscheidung des Talbodens. In den trockenen Gebieten im Südosten der USA findet nur sehr sporadisch bei starken Stürmen eine fluviale Umlagerung von Sedimenten statt, wodurch sich das Material des Kegels mit demjenigen der Ebene sehr selten vermischt (HASHIMOTO ET AL., 2008). Die Salzablagerungen der Ebenen lassen sich so gut vom dunkleren Sediment der angrenzenden

Gebirgsketten unterscheiden. Diese Unterscheidung ist in den Alpentälern gemässiger Breiten nicht möglich, da einerseits die meisten Bäche und Flüsse der Bergtäler ganzjährig Wasser und somit auch Sediment führen und andererseits aufgrund der zu niedrigen Temperaturen und der Topographie keine Salzablagerungen in den untersuchten Bergtälern vorhanden sind. Hingegen kann eine spektrale Unterscheidung zwischen Gletschern und Murkegeln vorgenommen werden. Die Unterschiede in der Auflösung der Daten, aber insbesondere der Komplexität des Terrains und der klimatischen Bedingungen haben also einen grossen Einfluss auf die Anwendbarkeit eines geomorphometrischen Algorithmus. So wie MILIARESIS & ARGIALAS (2000) Ansatz in den Alpen für die Klassierung von Murkegeln teilweise versagen würde, hätte der in dieser Arbeit entwickelte Ansatz in ariden Regionen bei der Extraktion von Schwemmkegeln wahrscheinlich auch wenig Erfolg. Es wäre auf jeden Fall interessant, diesen Sachverhalt zu untersuchen.

6.2 Vor- und Nachteile der Verwendung eines hoch-aufgelösten DHM zur Klassierung von Murkegeln

2. Forschungsfrage: Was sind Vorteile der Verwendung eines hoch-aufgelösten DHM in der Klassifikation von Murkegeln und wo liegen die Nachteile ?

Zur Beantwortung dieser Forschungsfrage wurden die Klassifikationen der Murkegel für das Val Müstair, das Mattertal und das Goms mit dem DHM25 durchgeführt und anschliessend mit den Resultaten, die das swissALTI3D geliefert hatte, verglichen.

6.2.1 Vorteile

Aufgrund der höheren Auflösung und der daraus folgenden, besseren Modellierung der Oberfläche ergeben sich einige Vorteile für eine Klassifikation der Murkegel mittels hoch-aufgelöster Daten.

Abflussmodellierung

In der Literatur wird oft erwähnt, dass eine feinere Auflösung eines DHM eine realitätsgetreue Modellierung des Abflussnetzwerks erlaubt und beispielsweise weniger fehlerbehaftet ist, als wenn grob aufgelöste DHM verwendet werden (ANDERSON ET AL., 2014; KIENZLE, 2004; YANG ET AL., 2014). Untersuchungen des $LRMSE$ und des $LRMSE_{ref}$ bestätigten dies für diese Studie teilweise. In drei von vier Fällen sind die Werte für die Abflussmodellierung kleiner, wenn sie mittels swissALTI3D durchgeführt wurden. Nur der $LRMSE$ der Abflussakkumulation des Mattertals, berechnet mit dem swissALTI3D, schneidet etwas schlechter ab, als unter Verwendung des DHM25. Dies liegt an der Tatsache, dass die auf dem Gletscher modellierten Abflüsse für den Fall der Berechnung des swissALTI3D weiter hinauf reichen und deshalb eine grössere Distanz zur Referenz aufweisen. Innerhalb des Tals und an den Bergflanken folgen sie der Referenz genauer als die DHM25-Abflussmodellierung. Die genauere Abflussmodellierung erlaubt eine bessere Wahl der Seedpixel und führt zu weniger Falschklassifikationen.

Begrenzung der Kegelform

Ein Vorteil, der sich ganz deutlich in der höheren (vertikalen) Auflösung widerspiegelt, ist die genauere Abgrenzung der Kegelform. Die Neigungsunterschiede sind dadurch auch feiner, was eine relativ genaue Begrenzung des Kegels durch das Ähnlichkeitskriterium erlaubt. Wenn man die Abbildungen 5.3 und 5.5 vergleicht, kann man sehen, dass die Klassifikation mittels DHM25 insgesamt zwei grosse Kegelgruppen à insgesamt 10 Kegel klassiert, während sieben Kegel durch die swissALTI3D-Klassifikation zusammengefasst wurden. Entscheidend ist, dass im ersten Fall nur auf sechs Kegeln Seedpixel zu liegen kamen¹ und die restlichen Kegel nur durch seitliches «Auslaufen» dieser Kegel klassiert werden. Dies hat zur Folge, dass einerseits der PPV sinkt und andererseits die höhere Sensitivität der Klassierung mittels DHM25 auf dem Umstand beruht, dass der *region-growing* Algorithmus nur aufgrund der Nichtdetektion von Kegelgrenzen neue Kegel extrahiert hat. In der Klassierung des Mattertals mittels swissALTI3D ist das auch der Fall, jedoch in geringerer Masse. Nur der Kegel von Herbriggen und jener nördlich von St.Niklaus wurden durch seitliches Auslaufen und nicht durch Seedpixel klassiert. Im Goms ist der

¹Ursprünglich waren es neun Kegel. Drei Kegel wurden durch die Grössenfilterung entfernt, da sie zu klein waren (siehe 5.2.3)

Sachverhalt noch deutlicher, da das Tal breiter ist und die Kegel dadurch weniger steil aber besser abgegrenzt sind.

Rauigkeitsindex

Der Versuch der Gletscherfilterung mittels Rauigkeitsindex zeigt klar, dass ein hoch aufgelöster Datensatz kleinräumige Oberflächenvariationen abzubilden vermag, während ein DHM mit 25 Metern Zellenbreite schon eine zu grobe Oberflächenabtastung aufweist. Für die Unterscheidung der Murkegel von den Gletschern empfiehlt sich zwar eine Gletschermaske, welche durchaus auf beide Datensätzen angewandt werden kann. Allerdings sind solche Daten nicht immer vorhanden. In diesem Fall sind hoch aufgelöste Höhenmodelle im Vorteil, da man aus ihnen direkt die Rauigkeit ableiten kann. Statistische Tests in dieser Arbeit haben gezeigt, dass es signifikante Rauigkeitsunterschiede zwischen Gletschern und Murkegeln, aber auch Überlappungen der Wertebereiche gibt, wodurch die Anwendung der Rauigkeitsfilterung zu einer Einbusse in der Sensitivität oder dem PPV führen würde.

Oberflächenmodellierung

Ein methodischer Vorteil ist, dass sich mit abnehmender Zellenbreite die Werte der 1. und 2. Ableitung (Neigung und Krümmung) ungeachtet der mathematischen Berechnung der Oberfläche immer mehr angleichen (KIENZLE, 2004). Dies bedeutet, dass beispielsweise Wood's Methode (WOOD, 1996) oder die in ArcGIS implementierte Methode für die Oberflächengenerierung verwendet werden kann und ähnliche Resultate bei der Seedpixel-Generierung und der Klassifikation erzielt werden können. Das erleichtert die Vergleichbarkeit.

6.2.2 Nachteile

Glättung

Für die Klassierung der Murkegel mussten sowohl das Neigungs- als auch das Krümmungsraster stark geglättet werden, damit die Homogenität innerhalb der Murkegel abgebildet werden konnte. Dies suggeriert, dass die Murkegel auf einem anderen Skalenniveau besser abgebildet werden, wobei dieses aber zwischen der zwei Meter - Auflösung des swissALTI3D und der 25 Meter - Auflösung des DHM25 liegt. Durch die Glättung werden

einerseits zwar mögliche Höhenfehler des DHM korrigiert, andererseits werden mühsam gewonnene Höhendaten gemittelt, wobei viel Information verloren geht.

Schutzbauten und Strassen

Schutzbauten werden nur durch hoch aufgelöste DHM abgebildet. Für Anwendungen, die Massenbewegungsprozesse modellieren, sind diese Informationen sicher nützlich, in der Murkegelklassifikation sind sie eher hinderlich. Es handelt sich um anthropogene Werke, die als Folge natürlicher Prozesse errichtet wurden, sie reflektieren den natürlichen Prozess einer Kegelentstehung nicht. Durch starke Neigungsanstiege verhindern solche Bauwerke die vollständige Klassifikation einer Kegeloberfläche was zu einer verschlechterten Sensitivität führt. Strassen bis hin zu kleinen Feldwegen werden durch das swissALTI3D detektiert. Verlaufen diese quer über den Kegel, so ist es möglich, dass der *region-growing* Algorithmus sie auch weit über den Murkegel hinaus als Teil dessen klassiert, da Strassen im Vergleich zu ihrer direkten Umgebung weniger stark geneigt sind homogene Oberflächen aufweisen.

Fehler in LiDAR-Daten

Auf LiDAR-Daten basierende DHM bilden die Oberfläche sehr genau ab. Allerdings muss diese für Objekte, welche der Laser nicht durchdringen kann - beispielsweise Häuser, Brücken oder Baumstämme - stark interpoliert und gefiltert werden (REUTER ET AL., 2009). Dies führt zu Artefakten in den *land-surface parameter* und in der Abflussmodellierung, für welche unnatürliche Senken oder Hindernisse entstehen. Als Beispiel für Artefakte soll der Murkegel von Täsch im Mättertal dienen (siehe Abbildung 6.3). Dieser ist relativ dicht bebaut. Da die *first echoes* der empfangenen Laserpulse bei der Brücke und den Häusern nicht der Geländeoberfläche sondern der jeweiligen Objektoberfläche entsprechen, wird die Geländeoberfläche interpoliert. Dadurch entsteht bei bebauten oder stark bewaldetem Gebiet eine künstliche Oberflächenrauigkeit, die nicht von Murgangablagerungen stammt. Ein hoher Rauigkeitswert muss demzufolge nicht gleich bedeuten, dass es sich bei der Oberfläche um einen Murkegel handelt. Für die Gletscherfilterung ist das allerdings nicht so bedeutend, da sich auf Gletschern gar keine Gebäude befinden und die Oberfläche somit glatter ist als diejenige eines Kegels. Ein weiteres, schönes Beispiel ist die Filterung von Brücken. Diese Aufgabe stellt die Hersteller von LiDAR-gestützten DHM immer wieder vor Probleme REUTER ET AL. (2009). In Abbildung 6.3

wirkt die Brücke als Hindernis, wodurch der Abflussakkumulations-Algorithmus einen anderen Weg sucht. was dazu führt, dass das Gerinne fälschlicherweise aus dem Ufer tritt. Der so geänderte Gerinneverlauf kann zu einer Verschiebung oder zum Nicht-modellieren der Seedpixel führen.

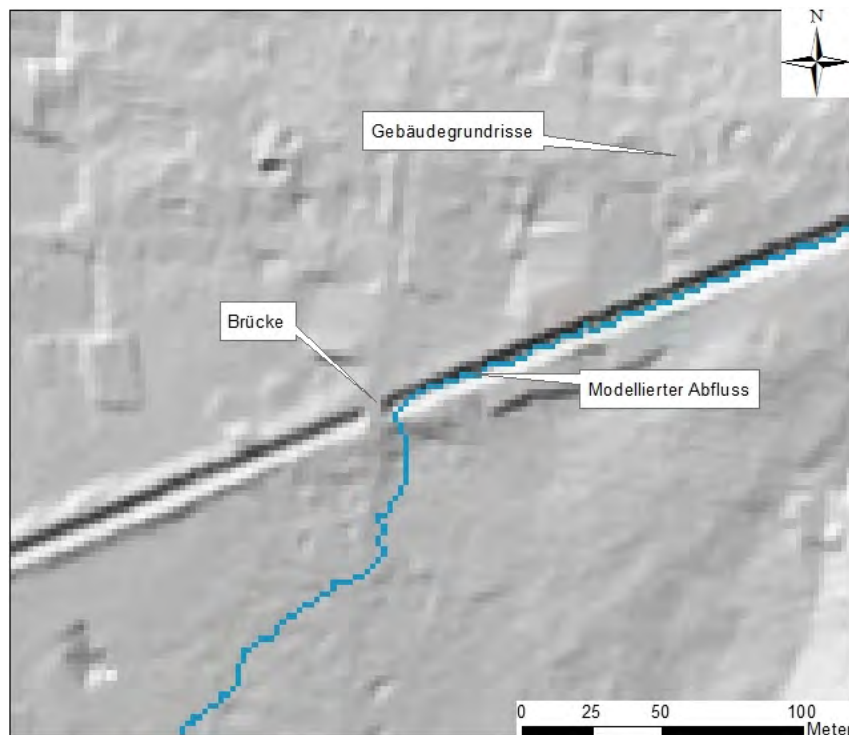


Abbildung 6.3: Artefakte des swissALTI3D auf dem Murkegel von Täsch. Verwendete Daten: swissALTI3D Hillshade von swisstopo.

Prozessierungsaufwand

Ein nicht ganz unerhebliches Problem ist der Datenumfang eines hoch aufgelösten Datensatzes. Zum Vergleich: Die ganze Schweiz im DHM25 enthält als Raster in etwa gleich viele Zeilen und Spalten wie das Matternal im swissALTI3D. Durch den Datenumfang leidet nicht nur die Berechnungsdauer, sondern es müssen 64bit Programme installiert werden, da die Dateigröße schnell einmal die 4GB-Limite der 32bit Systeme übersteigt. ArcPy war bis vor kurzem allerdings nur als 32bit Applikation erhältlich, weshalb auf dessen Funktionalitäten verzichtet werden musste.

6.3 Möglichkeiten und Schwierigkeiten in einem automatischen Klassifikationsprozess

3. Forschungsfrage: Wo liegen die Möglichkeiten und die Schwierigkeiten bei einem automatischen Verfahren zur Extraktion von Murkegeln?

Möglichkeiten

Die Vorteile eines automatischen Klassifikationsprozesses hängen eng mit der Qualität der Klassifikation zusammen. Eine zuverlässige Klassifikation erlaubt eine schnelle, flächendeckende und kostengünstige Klassifikation von Murkegeln. Durch die Definition der einzelnen Parameter und Schwellenwerte entsteht eine Klassifikation, die insofern objektiv ist, als sie immer nach den gleichen Kriterien erstellt wird. Dadurch kann sie als Basis für geomorphologische Kartierungen verwendet werden, beispielsweise um eine erste Sichtung der Murkegel vornehmen zu können. Des Weiteren können durch die automatische Extraktion basierend auf digitalen Höhenmodellen weitere Eigenschaften wie beispielsweise die mittlere Neigung oder die Gesamtfläche der Murkegel über eine grosse Fläche sehr effizient berechnet werden. Ebenfalls lässt sich, allerdings mit mehr Aufwand, das Volumen der Murkegel berechnen (OTTO & SCHROTT, 2010), was wiederum die Frage beantworten würde, wie viel Material durch die verschiedenen Prozesse abgelagert wurde und Rückschlüsse auf die Erosionsprozesse im Einzugsgebiet erlaubt. SCHEIDL ET AL. (2008) erwähnen auch die Möglichkeit, Volumina von einzelnen Murgängen anhand zweier zu unterschiedlichen Zeitpunkten generierter LiDAR-DHM zu berechnen. Eine zuverlässige Kartierung der Murkegel erlaubte eine grossflächige Maskierung der in Frage kommenden Gebiete und somit auch die effiziente Volumenabschätzung mehrerer, zur gleichen Zeit ausgelöster Murgangereignisse (wie etwa im Sommer 1987). In der vorliegenden Arbeit lieferte die automatische Klassifikation Hinweise bezüglich einiger Kegelstandorte, die mittels Schummerung und Luftbilder nicht erkannt worden war, da die betroffenen Kegel nicht die typische Form aufwiesen oder diese zumindest nicht sehr stark ausgeprägt war. Nicht zuletzt erlaubt die Güte der automatischen Klassifikation auch Rückschlüsse auf das Prozessverständnis. Wurden die wichtigsten Aspekte der Murkegelentstehung berücksichtigt, zeichnet sich das in einer hohen Sensitivität und Genauigkeit aus. Falls gewisse wichtige Aspekte unterlassen wurden, zeichnet sich das in schlechteren Klassifi-

kationsresultaten ab. Beispielsweise wurden in der vorliegenden Arbeit anfänglich einzig Neigungsgrenzen verwendet, um die Ausdehnung der Murkegel zu definieren. Dass die abrupten Neigungsänderungen innerhalb dieser Neigungsgrenzen ebenfalls einen Einfluss auf die Massenbewegung und somit auf die Kegelform haben, wurde ausser Acht gelassen. Dadurch wuchsen die Kegel viel zu weit ins Tal hinein.

Schwierigkeiten

Die Hauptschwierigkeit, welche alle automatischen Prozesse und Modellierungen betrifft, liegt in der Tatsache, dass die Realität nicht in ihrer ganzen Komplexität durch ein Modell abgebildet werden kann. In Bezug auf die Murkegel bedeutet dies, dass nicht alle Prozesse und Prozessvariationen aus einem DHM modelliert werden können, welche zur Form eines Kegels beigetragen haben. Somit besteht die Herausforderung in der Suche nach den Parametern, die einen Murkegel möglichst gut beschreiben. Eine weitere Schwierigkeit in dieser Arbeit stellten insbesondere die Schwellenwerte der einzelnen Parameter dar. Eine automatische Klassifikation verlangt nach einer allgemein gültigen Beschreibung des Bildungsprozesses und der Form der Murkegel. Die für die Beschreibung dieser Faktoren verwendeten Parameter Abfluss, Krümmung und Neigung sollten deshalb so gewählt werden, dass deren Kombination möglichst für das ganze Formenspektrum der Murkegel als auch für verschiedenste Untersuchungsgebiete Gültigkeit besitzt. In der vorliegenden Arbeit wurden dazu oft automatische Grenzwerte für die verschiedenen Parameter und für die Filterung verwendet. Es stellte sich allerdings heraus, dass die automatische Definition von Grenzwerten sehr schwierig ist und nach Meinung des Autors nicht immer Sinn macht. Beispielsweise variieren die Werte für die Abflussakkumulation je nach Grösse des Untersuchungsgebiets. Die Komplexität eines Abflussnetzwerks hängt von vielen Faktoren ab und kann durch einen Grenzwert nicht akkurat wiedergegeben werden. Weiter sind Grenzwerte von der Betrachtungsskala beziehungsweise der Auflösung der Daten abhängig. So bewirkt die Grössenfilterung für das Mattertal im Falle der DHM25-Klassifikation, dass drei Kegel herausgefiltert werden (siehe 5.2.3). Da ein Pixel nun nicht mehr vier m^2 sondern $625m^2$ entspricht, hat dies massive Auswirkungen auf die Güte der Klassifikation, da eine durch den Durchschnitt definierte Kegelgrenze Flächen einiges grössere Gebiete herausfiltert, wenn die Fläche pro Zelle zunimmt. Da sich eine individuelle an das Untersuchungsgebiet angepasste Auswahl des Grenzwerts aber nicht mit einer automatischen Extraktion vereinbaren lässt, müssen Ungenauigkeiten der Modellierung in Kauf genom-

men werden. Generell sind exakte Trennlinien, wie sie Grenzwerte darstellen «unnatürlich», sie reduzieren jedoch die Komplexität natürlicher Prozesse und Formen, was die Quantifizierung dieser erleichtert, jedoch auch zu Ungenauigkeiten in der Klassifikation führt.

7 Schlussfolgerung

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Ergebnisse und die daraus gewonnenen Erkenntnisse zusammengefasst präsentiert. Zum Abschluss werden im Ausblick Vorschläge zur Verbesserung der Klassifikation und zu künftigen Forschungsprojekten gegeben.

7.1 Erreichtes

Hauptziel der Arbeit war es, eine Methodik zu entwickeln, welche es erlaubt, Murkegel in Gebieten mit gemässigtem Klima wie beispielsweise den Alpen aus einem hoch-aufgelösten digitalen Höhenmodell zu extrahieren und zu klassifizieren. Weiter sollte ein Vergleich der Klassifikationen unter Anwendung unterschiedlich aufgelöster digitaler Höhenmodelle gemacht werden. Erreicht wurden die folgenden Punkte:

- Wichtige formgebende Merkmale und Prozesse, die zur Bildung von Murkegeln beitragen, konnten durch morphometrische Variablen (*land-surface parameter*) operationalisiert werden.
- Die allgemeine Oberflächenmodellierung nach WOOD (1996) konnte in Python implementiert werden. Daraus konnten Neigung und Plankurvatur beliebiger Glättung berechnet werden.
- Die Güte der Abflussakkumulation zur Bildung des Flussnetzwerks als Parameter für die Extraktion der Murkegel wurde anhand des LRMSE und LRMSE_ref überprüft.
- Es wurde ein *region-growing*-Algorithmus zur Klassifikation von Murkegeln entwickelt und in Python implementiert.
- Der statistisch signifikante Unterschied der Oberflächenrauigkeit zwischen Gletschern und Murkegeln wurde mittels Rauigkeitsindex von CAVALLI & MARCHI (2008) aufgezeigt.

- Eine Methodik wurde entwickelt, welche unter Verwendung eines hoch aufgelösten Datensatzes durchschnittlich 52.5% aller Murkegel erkennt und deren Genauigkeit bei 82% liegt.
- Vor- und Nachteile der Verwendung eines hoch aufgelösten digitalen Höhenmodells bei der Klassierung von Murkegeln konnten aufgezeigt werden.

7.2 Erkenntnisse

Während des Arbeitsprozesses und insbesondere durch die Auswertung der Resultate konnten einige wichtige Erkenntnisse gewonnen werden. Die wahrscheinlich wichtigste Erkenntnis bestand in der Einsicht, dass sich, zumindest unter Anwendung der in der vorliegenden Arbeit entwickelten Methodik, keine perfekte Extraktion und Klassifikation der Murkegel erreichen liess, selbst wenn qualitativ hochwertige, fein aufgelöste Daten zur Verfügung stehen. Diese Erkenntnis wird nun in der Folge etwas detaillierter beschrieben und in Bezug auf die aufgestellten Forschungsfragen ergänzt.

Der entwickelte Ansatz zur Extraktion von Murkegeln im alpinen Raum mittels eines hoch-aufgelösten DHM lieferte mässige Ergebnisse in der Erkennung (Sensitivität) von Murkegeln und gute Resultate in der Genauigkeit der Murkegelbeschreibung (PPV).

Methodische Limiten, welche die Sensitivität beeinflussen, sind die Modellierung des Abflusses wie auch die Definition der Neigungsgrenzwerte der Seedpixel und die Annahme eines mittig verlaufenden Gerinnes auf dem Murkegel. Insgesamt erlaubt die Definition der Seedpixel, gegeben durch die Kombination der *land-surface parameter*, keine Unterscheidung zwischen Murkegeln und Gletschern. Zur Unterscheidung muss die Oberflächenrauigkeit oder, noch besser, eine Gletschermaske hinzugezogen werden.

Prozess-bedingte Limiten sind vor allem durch die Richtungsänderungen des Gerinnes auf dem Murkegel selbst wie auch durch die Eintiefung des Gerinnes gegeben. Zusätzlich hat die Morphologie des Tales einen Einfluss auf die Klassifikation. Ebenfalls zu Falschklassifikationen führen unklar definierte Kegelränder. Der Vergleich mit der Arbeit von MILIARESI & ARGIALAS (2000) zeigt, dass die geomorphologischen und klimatischen Bedingungen einen grossen Einfluss auf den Erfolg einer Klassifikation haben und bei der Entwicklung eines automatischen Klassifikationsverfahrens immer berücksichtigt werden müssen.

Die Vorteile der Verwendung eines hoch aufgelösten DHM zur Murkegelklassifikation überwiegen die Nachteile. Die grössten Vorteile liegen in der genauen Abgrenzung der Kegel, der besseren Modellierung des Abflussnetzwerks, der Möglichkeit einer Beschreibung der Oberflächenrauigkeit und somit einer Gletscherfilterung und nicht zuletzt auch in der Tatsache, dass sich die Werte von Oberflächenderivaten, gerechnet durch verschiedene Methoden, bei der Verwendung von hoch aufgelösten DHM angleichen. Demgegenüber stehen gewisse Nachteile. Einerseits muss die Oberfläche für eine gute Klassifikation der Kegel stark geglättet werden, wodurch das Potenzial hoch aufgelöster Daten nicht vollumfänglich genutzt wird. Weiter verringern anthropogene Bauwerke auf den Kegeln die Sensitivität und Relevanz (PPV) der Klassifikation. Durch die hohe Auflösung fallen bereits für kleine Gebiete hohe Datenmengen an, für welche der Prozessieraufwand beträchtlich ist. Trotz der Nachteile konnten in dieser Arbeit Murkegel genauer extrahiert werden, wenn hoch aufgelöste DHM zur Klassifikation benutzt wurden. Die Resultate deuten darauf hin, dass insbesondere der positiv-prädiktive Wert PPV von der hohen Auflösung profitiert.

Die Möglichkeiten einer automatischen Extraktion liegen in der Effizienz, grosse Flächen nach Murkegeln zu klassifizieren, in der Möglichkeit, die klassifizierten Flächen quantitativ analysieren zu können und nicht zuletzt auch in der Hilfe, Bildungsprozesse der Kegel besser zu verstehen.

Nachteile oder Schwierigkeiten sind vor allem die Komplexität der zu beschreibenden Formen. Eine gute automatische Klassifikation sollte möglichst alle Bildungsprozesse und Formenfacetten widerspiegeln, was aber nicht möglich ist. Eine Automatisierung der Klassifikation verlangt zudem nach automatisch definierten Grenzwerten der beschreibenden Merkmale. Dies führt aufgrund der unterschiedlichen Voraussetzungen in den jeweiligen Untersuchungsgebieten zwangsläufig zu Unsicherheiten und Fehlern in der Klassifikation.

7.3 Ausblick

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren zur Murkegelextraktion aus hoch-aufgelösten Daten entwickelt. Während das Verfahren eine gute Unterscheidung

zwischen Murkegeln und anderen Formen erlaubt, bleibt die Erkennung der Kegel selber ungenügend, insbesondere für steile, enge Täler. In dieser Hinsicht kann in Zukunft noch einiges verbessert werden. Ein anderer Ansatz der Seedpixeldefinition könnte eine Verbesserung in der Sensitivität der Klassifikation hervorrufen. Beispielsweise wäre die Verwendung einer Flussnetzwerkmodellierung, die für hoch aufgelöste Daten entwickelt wurde PASSALACQUA ET AL. (2010), vielversprechend. Auch wäre die Verwendung einer Abflussmodellierung interessant, welche den Abfluss nicht auf eine Zelle begrenzt und Divergenz erlaubt (z.B. GRUBER & PECKHAM, 2009). Murgänge weisen auf Murkegeln sehr oft einen divergenten Abfluss auf, wenn sie aus dem Gerinne treten. Dadurch würde die Verschneidung von Neigung, Plankurvatur und Abfluss auf den Kegeln mehr Seedpixel generieren, die nicht nur innerhalb des Gerinnes liegen würden. Dies würde möglicherweise zu einer Erkennung der Kegel führen, die wegen des Gerinneverlaufs, dessen Eintiefung oder der Schutzbauten bis anhin nicht erkannt wurden.

Eine weitere Verbesserung der Klassifikation könnte mittels Verwendung einer Gletschermaske zur Vorfilterung erreicht werden. Freilich wäre der zusätzliche Einbezug von Fernerkundungsdaten dafür notwendig. Mögliche Methoden der Gletscherextraktion werden beispielsweise in BOLCH ET AL. (2010) vorgestellt.

Zur bessern Unterscheidung der Kegelgrenzen vor allem unter Verwendung des DHM25 könnte zusätzlich zum Neigungsverhältnis die Profilkurvatur hinzugezogen werden oder durch dieses ersetzt werden. Erste Untersuchungen deuten darauf hin, dass Übergänge von Kegel zur angrenzenden Ebene oder Bergflanke teilweise besser durch ein Profilkurvaturverhältnis als durch ein Neigungsverhältnis erfasst werden.

Aufgrund der Tatsache, dass die Grenzen zwischen Kegeln und Ebenen nicht immer klar ersichtlich sind und sowohl Kartierung als auch Klassifikation dadurch sehr schwierig werden, käme eine Verwendung einer *fuzzy classification* in Frage (EVANS, 2012).

Um Aussagen über die Anwendbarkeit des hier vorgestellten Klassifikationsverfahren auf andere Gebiete machen zu können, müsste die gleiche Studie in Gebieten gemäßigter Klimazonen (beispielsweise Japan) als auch in ariden Gebieten wiederholt werden. Dies würde mit Sicherheit weitere Limiten des Algorithmus aber auch Möglichkeiten zur Verbesserung der Methode aufzeigen.

Interessant wäre eine Abschätzung des Gesamtvolumens der klassifizierten Kegel. Das setzt eine qualitativ hochwertige Klassifikation voraus. Eine solche Volumenabschätzung liesse sich gemäss den in OTTO & SCHROTT (2010) vorgestellten Methoden berechnen.

Abschliessend soll vermerkt werden, dass gerade die Verwendung der Oberflächenrauigkeit ein grosses Potenzial birgt, Oberflächen aufgrund ihrer Ablagerungsprozesse zu unterscheiden. Intensive Untersuchungen im Feld, die die Unterscheidung von Mur- und Schwemmkegeln zum Ziel haben, könnten mit Oberflächenrauigkeiten gepaart werden, um allfällige Zusammenhänge erkennen und beschreiben zu können.

Literatur

- ANDERSON, D. L.; AMES, D. P.; YANG, P. (2014): *Quantitative Methods for Comparing Different Polyline Stream Network Models*. *Journal of Geographic Information System*, 06(02):88–98.
- ARGIALAS, D. P.; TZOTSOS, A., (Hg.) (2006): *Automatic Extraction of Physiographic Features and Alluvial Fans in Nevada, USA from Digital Elevation Models and Satellite Imagery Through Multiresolution Segmentation and Object-Oriented Classification*.
- BENZ, D. (1998): *Die geomorphologische Entwicklung des Murfächers bei Tschieru im Münstertal: - erfasst mit dendrochronologischen Methoden*. Dissertation, Universität Zürich, Zürich.
- BERGER, C.; MCARDELL, B. W.; SCHLUNEGGER, F. (2011): *Direct measurement of channel erosion by debris flows, Illgraben, Switzerland*. *Journal of Geophysical Research*, 116(F1):1–18.
- BERTI, M.; CORSINI, A.; CAVALLI, M. (2013): *Comparative analysis of surface roughness algorithms for the identification of active landslides*. *Geomorphology*, 182:1–18.
- BÖGLI, A. (1941): *Morphologische Untersuchungen im Goms*. Dissertation, Universität Freiburg, Freiburg.
- BÖHNER, J.; SELIGE, T.; RINGELER, A. (2006): *Image segmentation using representativeness analysis and region growing*. SAGA—Analyses and Modelling Applications. In: *Göttinger Geographische Abhandlungen*, 115:29–38.
- BOLCH, T.; MENOUNOS, B.; WHEATE, R. (2010): *Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005*. *Remote Sensing of Environment*, 114(1):127–137.

- BOLONGARO-CREVENNA, A.; TORRES-RODRÍGUEZ, V.; VALENTINO, S.; DAWN, F.; ARTURO ORTIZ, M. (2005): *Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico*. *Geomorphology*, 67(3-4):407–422.
- BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE (2005): *DHM25: Das digitale Höhenmodell der Schweiz*. URL <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/dhm25.parsysrelated1.41325.downloadList.66735.DownloadFile.tmp/dhm25infode.pdf>.
- BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE (2010): *SWISSIMAGE Das digitale Farborthophotomosaik der Schweiz: Produktinformation*.
- BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE (2012a): *Pixelkarten: Produkteinformation*.
- BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE (2012b): *swissALTI3D Ausgabebericht 2012*.
- BUNDESAMT FÜR LANDESTOPOGRAFIE (2014): *swissALTI3D Ausgabebericht 2014*. URL <http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/de/home/products/height/swissALTI3D>.
- CAVALLI, M.; MARCHI, L. (2008): *Characterisation of the surface morphology of an alpine alluvial fan using airborne Lidar*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8:323–333.
- COROMINAS, J.; REMONDO, J.; FARIAS, P.; ESTEAVO, M.; ZÉZERE, J.; DÍAZ DE TERÁN, J.; DIKAU, R.; SCHROTT, L.; MOYA, J.; GONZÁLEZ, A. (1996): *Debris Flow*. In DIKAU, R., (Hg.) *Landslide recognition*, Bd. no. 5, S. 161–180. Wiley, Chichester and New York.
- DE SCALLY, F. A.; OWENS, I. F.; LOUIS, J. (2010): *Controls on fan depositional processes in the schist ranges of the Southern Alps, New Zealand, and implications for debris-flow hazard assessment*. *Geomorphology*, 122(1-2):99–116.
- DIKAU, R.; GÄRTNER, H.; HOLL, B.; KIENHOLZ, H.; MANI, P.; ZIMMERMANN, M. (1996): *Untersuchungen zur Murgangaktivität im Mattertal, Wallis, Schweiz*. In INTERPRAEVENT, (Hg.) *Proceedings of the International Symposium INTERPRAEVENT*, Bd. 1, S. 397–408. Garmisch-Partenkirchen.

- EVANS, I. S. (2012): *Geomorphometry and landform mapping: What is a landform?* Geomorphology, 137(1):94–106.
- FARR, T. G.; CHADWICK, O. A. (1996): *Geomorphic processes and remote sensing signatures of alluvial fans in the Kun Lun Mountains, China.* Journal of Geophysical Research, 101:23091–23100.
- FIELDING, A. H.; BELL, J. F. (1997): *A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models.* Environmental Conservation, 24(01):38–49.
- FRANKEL, K. L.; DOLAN, J. F. (2007): *Characterizing arid region alluvial fan surface roughness with airborne laser swath mapping digital topographic data.* Journal of Geophysical Research, 112(F2):1–14.
- GAMMA, P. (2000): *dfwalk - Ein Murgang-Simulationsprogramm zur Gefahrenzonierung.* Dissertation, Universität Bern, Bern.
- GEMEINDE VAL MÜSTAIR (2011): *CDVM Geografie.* URL <http://www.cdvm.ch/HP/02deutsch/unsereGemeinde/geografie001.html>.
- GRAF, C.; DEUBELBEISS, Y.; BÜHLER, Y.; MEIER, L.; MCARDELL, B. W.; CHRISTEN, M.; BARTELT, P. (2011): *Gefahrenkartierung Mattertal: Grundlagenbeschaffung und numerische Modellierung von Murgängen.* In GRAF, C., (Hg.) *Mattertal - Ein Tal in Bewegung*, S. 85–112. Birmensdorf.
- GRUBER, S.; PECKHAM, S. (2009): *Land-Surface Parameters and Objects in Hydrology.* In HENGL, T.; REUTER, H. I., (Hg.) *Geomorphometry*, Bd. 33 von *Developments in Soil Science*, S. 171–194. Elsevier/Academic, Amsterdam and Oxford.
- HÄBERLI, W. (1991): *Permafrost und Murgänge in der alpinen Periglazialstufe.* In GAS-SER, (Hg.) *Bündner Wald 6*, Bd. 44 von *Bündner Wald*, S. 59–64.
- HASHIMOTO, A.; OGUCHI, T.; HAYAKAWA, Y.; LIN, Z.; SAITO, K.; WASKLEWICZ, T. A. (2008): *GIS analysis of depositional slope change at alluvial fan-toes in Japan and the American Southwest.* Geomorphology, 100:120–130.

- HENGL, T.; EVANS, I. S. (2009): *Mathematical and Digital Models of the Land Surface*. In HENGL, T.; REUTER, H. I., (Hg.) *Geomorphometry*, Bd. 33 von *Developments in Soil Science*, S. 31–63. Elsevier/Academic, Amsterdam and Oxford.
- HUGGEL, C.; KÄÄB, A.; HÄBERLI, W.; KRUMMENACHER, B. (2003): *Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (3):647–662.
- IWAHASHI, J.; PIKE, R. J. (2007): *Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature*. *Geomorphology*, 86(3–4):409–440.
- JARMAN, D.; AGLIARDI, F.; CROSTA, G. B. (2011): *Megafans and outsize fans from catastrophic slope failures in Alpine glacial troughs: the Malser Haide and the Val Venosta cluster, Italy*. In JABOYEDOFF, M., (Hg.) *Slope tectonics*, Bd. 351, S. 253–277. Geological Society, London.
- JONES, K. H. (1998): *A comparison of algorithms used to compute hill slope as a property of the DEM*. *Computers & Geosciences*, 24(4):315–323.
- 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.
- KOSTACHUCK, R. A.; MACDONALD, G. M.; PUTNAM, P. E. (1986): *Depositional process and alluvial fan-drainage basin morphometric relationships near Banff, Alberta, Canada*. *Earth Surface Processes and Landforms*, 11:471–484.
- KYOJI S.; TAKASHI O. (2005): *Slope of alluvial fans in humid regions of Japan, Taiwan and the Philippines*. *Geomorphology*, 70(1–2):147–162.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. (1977): *The measurement of observer agreement for categorical data*. *Biometrics*, 33:159–174.
- LOUIS, H. (1968): *Allgemeine Geomorphologie*. Walter de Gruyter & Co, Berlin, 3 Aufl.
- LUCIEER, A.; STEIN, A. (2005): *Texture-based landform segmentation of LiDAR imagery*. *Data Quality in Earth Observation Techniques ITC Earth Observation Science*

- Department International Workshop "Data Quality in Earth Observation Techniques", 6(3–4):261–270.
- MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. (2009): *Landforms and Landform Elements in Geomorphometry*. In HENGL, T.; REUTER, H. I., (Hg.) *Geomorphometry*, Bd. Volume 33 von *Developments in Soil Science*, S. 227–254. Elsevier/Academic, Amsterdam and Oxford.
- MAY, C. L.; GRESSWELL, R. E. (2004): *Spatial and temporal patterns of debris-flow deposition in the Oregon Coast Range, USA*. *Geomorphology*, 57(3–4):135–149.
- MELELLI, L.; TARAMELLI, A. (2004): *An example of debris-flows hazard modelling using GIS*. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4:347–358.
- MILIARESIS, G. Ch.; ARGIALAS, D. P. (2000): *Extraction and Delineation of Alluvial Fans from Digital Elevation Models and Landsat Thematic Mapper Images*. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 66(9):1093–1101.
- MINÁR, J.; EVANS, I. S. (2008): *Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping*. *Geomorphology*, 95(3–4):236–259.
- NELSON, A.; REUTER, H. I.; GESSLER, P. (2009): *DEM Production Methods and Sources*. In HENGL, T.; REUTER, H. I., (Hg.) *Geomorphometry*, Bd. 33 von *Developments in Soil Science*, S. 65–85. Elsevier/Academic, Amsterdam and Oxford.
- N.N. (2013a): *matplotlib: python plotting — Matplotlib 1.3.1 documentation*. URL <http://matplotlib.org/index.html>.
- N.N. (2013b): *NumPy*. URL <http://www.numpy.org/>.
- N.N. (2014): *SciPy*. URL <http://www.scipy.org/>.
- OLAYA, V. (2009): *Basic Land-Surface Parameters*. In HENGL, T.; REUTER, H. I., (Hg.) *Geomorphometry*, Bd. 33 von *Developments in Soil Science*, S. 141–169. Elsevier/Academic, Amsterdam and Oxford.

- OTTO, J.-C.; SCHROTT, L. (2010): *Quantifizierung von rezenten und postglazialen Sedimentspeichern und Sedimentflüssen – Konzeptionelle Ansätze und aktuelle Studien aus den Ostalpen*. Salzburger Geographische Arbeiten, 46:1–13.
- PASSALACQUA, P.; TAROLLI, P.; FOUFOULA-GEORGIOU, E. (2010): *Testing space-scale methodologies for automatic geomorphic feature extraction from lidar in a complex mountainous landscape*. Water Resources Research, 46(11):1–17.
- PIKE, R. J. (2000): *Geomorphometry -diversity in quantitative surface analysis*. Progress in Physical Geography, 24(1):1–20.
- PIKE, R. J. (2005): *Digital Terrain Modeling*. In KEMPF-LEONARD, K., (Hg.) *Encyclopedia of Social Measurement*, S. 669–675. Elsevier, New York.
- PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. (2009): *Geomorphometry: A Brief Guide*. In HENGL, T.; REUTER, H. I., (Hg.) *Geomorphometry*, Bd. Volume 33 von *Developments in Soil Science*, S. 3–30. Elsevier/Academic, Amsterdam and Oxford.
- PITAS, I. (2000): *Digital image processing algorithms and applications*. Wiley, New York.
- REUTER, H. I.; HENGL, T.; GESSLER, P.; SOILLE, P. (2009): *Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis*. In HENGL, T.; REUTER, H. I., (Hg.) *Geomorphometry*, Developments in Soil Science, S. 87–121. Elsevier/Academic, Amsterdam and Oxford.
- RICKENMANN, D.; ZIMMERMANN, M. (1993): *The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis*. Geomorphology, 8:175–189.
- SCHEIDL, C.; RICKENMANN, D. (2010): *Empirical prediction of debris-flow mobility and deposition on fans*. Earth Surface Processes and Landforms, 35:157–173.
- SCHEIDL, C.; RICKENMANN, D.; CHIARI, M. (2008): *The use of airborne LiDAR data for the analysis of debris flow events in Switzerland*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 8:1113–1127.
- SCHMIDT, J.; EVANS, I. S.; BRINKMANN, J. (2003): *Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation*. International Journal of Geographic Information Science, 17(8):797–814.

- SEIJMONSBERGEN, A. C.; HENGL, T.; ANDERS, N. S. (2011): *Semi-Automated Identification and Extraction of Geomorphological Features Using Digital Elevation Data*. In SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. S., (Hg.) *Geomorphological mapping*, Bd. 15 von *Developments in earth surface processes*. Elsevier Science, Oxford.
- SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. (2002): *Fundamental quantitative methods of land surface analysis*. *Geoderma*, 107(1-2):1-32.
- SMITH, M. J. (2011): *Digital Mapping: Visualisation, Interpretation and Quantification of Landforms*. In SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. S., (Hg.) *Geomorphological mapping*, Bd. 15 von *Developments in earth surface processes*, S. 225-249. Elsevier Science, Oxford.
- SMITH, M. P.; ZHU, A.; BURT, J. E.; STILES, C. (2006): *The effects of DEM resolution and neighborhood size on digital soil survey*. *Geoderma*, 137(1-2):58-69.
- STALEY, D. M.; WASKLEWICZ, T. A.; BLASZCZYNSKI, J. S. (2006): *Surficial patterns of debris flow deposition on alluvial fans in Death Valley, CA using airborne laser swath mapping data*. *Geomorphology*, 74(1-4):152-163.
- TARBOTON, D. G. (1997): *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. *Water Resources Research*, 33(2):309-319.
- TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. (1991): *On the extraction of channel networks from digital elevation data*. *Hydrological processes*, 5(1):81-100.
- TEMME, A.J.A.M.; HEUVELINK, G.B.M; SCHOORL, J. M.; CLAESSENS, L. (2009): *Geostatistical Simulation and Error Propagation in Geomorphometry*. In HENGL, T.; REUTER, H. I., (Hg.) *Geomorphometry*, Bd. 33 von *Developments in Soil Science*, S. 121-140. Elsevier/Academic, Amsterdam and Oxford.
- VOLKER, H. X.; WASKLEWICZ, T. A.; ELLIS, M. A. (2007): *A topographic fingerprint to distinguish alluvial fan formative processes*. *Geomorphology*, 88(1-2):34-45.
- WHIPPLE, K. X. (1994): *Debris-flow fans: process and form*. Dissertation, University of Washington.

- WHIPPLE, K. X.; DUNNE, T. (1992): *The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California*. Geological Society of America Bulletin, 104:887–900.
- WILSON, J. P. (2012): *Digital terrain modeling*. Geospatial Technologies and Geomorphological Mapping Proceedings of the 41st Annual Binghamton Geomorphology Symposium, 137(1):107–121.
- WOOD, J. (1996): *The geomorphological characterisation of digital elevation models*. Dissertation, University of Leicester.
- YANG, P.; AMES, Daniel P.; FONSECA, A.; ANDERSON, D. L.; SHRESTHA, R.; GLENN, N. F.; CAO, Y. (2014): *What is the effect of LiDAR-derived DEM resolution on large-scale watershed model results?* Environmental Modelling & Software, 58(0):48–57.

CD-Inhalt

Auf der beiliegenden CD sind die vorliegende Arbeit und der Python-Code enthalten. Die folgende Tabelle gibt eine Übersicht des Inhalts.

Ordner	Dateiname	Beschreibung
Masterarbeit	Masterarbeit_mschmid.pdf	Arbeit im pdf-Format
	Masterarbeit_mschmid.rtf	Arbeit im rtf-Format
Murkegelextraktion	_init_.py	Ausführungsdatei
	utilities.py	Hilfsfunktionen
		Ascii - Array-Konversion
		Txt-Ascii-Konversion
		-Gleitendes Fenster
		Txt-Ascii-Konversion
		Flächenberechnung
		Neigungsberechnung
		Oberflächenberechnungen
		Neigungsberechnung
Plankurvaturberechnung		
regiongrow.py	Seedliste erstellen	
	Region-Growing	
	Rauigkeitsindexberechnung	
rauigkeitsindex.py		

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.

*Martin Schmid
Zürich, 30. September 2014*