

Department für Bautechnik und Naturgefahren

Institut für Alpine Naturgefahren

MORPHOMETRISCHE UNTERSUCHUNG VON MUR- UND SCHWEMMKEGELN IN DEN ÖSTERREICHISCHEN ALPEN UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DES PROZESSREGIMES

Masterarbeit

Eingereicht von

Michael Kessler

an der Universität für Bodenkultur, Wien Institut für Alpine Naturgefahren

Betreuer: Assoc. Prof. Dr. Roland Kaitna

Wien, Februar 2019

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die Arbeit selbständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Formulierungen und Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Diese schriftliche Arbeit wurde noch an keiner Stelle vorgelegt.

Datum:

Unterschrift:

Danksagung

Meinen besonderen Dank richte ich an ...

Assoc. Prof. Dr. Roland Kaitna

für die Inspiration zu dieser Arbeit, die motivierende Betreuung und den fachlichen Rat sowie die aufgeopferte Zeit.

Dipl.-Ing. David Prenner

für die wertvolle Unterstützung und die hilfreichen Tipps im Laufe dieser Arbeit.

ARätin Monika Stanzer

für die engagierte Begleitung des Studiums sowie die hilfreiche Unterstützung bei organisatorischen Fragen.

das Institut für Alpine Naturgefahren

für die Bereitstellung der Daten sowie der Hard- und Software zur Bearbeitung der Fragestellungen im Rahmen dieser Arbeit.

meine Freunde,

mit denen ich während des Studiums sowohl in als auch außerhalb Wiens eine schöne Zeit verbringen durfte.

meine Eltern, Geschwister und Großeltern,

die mich im Laufe des Studiums immer unterstützt und mir stets den Rücken gestärkt haben.

Abstract

In the alpine regions, alluvial fans are commonly used as sites for human settlement. These areas are prone to torrential hazards originating from the adjacent catchment, from which the torrential processes originated which built the fan in the first place. In many studies, the morphometric characteristics of fans are utilised to identify the torrential processes affecting the fan. However, for the Austrian Alps little information about such process-form relationships is known. Thus, selected morphometric parameters of fans located in two study areas in the Austrian Alps (Palten Valley and Pitz Valley) were extracted from a digital elevation model (resolution 1 x 1 m) through the implementation of a geographic information system and compared between (a) catchments showing different hydrogeomorphic processes (water flood and fluvial sediment transport vs. debris flow processes), (b) drainage basins showing a different geomorphological disposition regarding the process type estimated through Melton's ruggedness number and (c) the study areas. Fans affected mainly by debris flow processes generally showed lower expansions and higher slopes as well as a higher ruggedness and surface-heterogeneity than fans predominantly affected by water flood and fluvial sediment transport. For the fan morphometric parameters describing the slope, ruggedness and surface heterogeneity an additional effect of the characteristics of the study area (e.g. geology, lithology, climate, land use) was observed. The comparison referring to the Melton ratio of the catchments showed less evidence, which is mainly due to a slight discrepancy between the geomorphological disposition regarding the process type and the recorded events. In addition, the results indicated a significant lower angle of inclination for the fans than for the feederchannels in the adjacent basins. However, no abrupt slope decrease could be observed at the fan apex.

Keywords: Debris flow fans, Fluvial fans, Alluvial fans, Geomorphology, Debris flows, Fluvial processes, Torrential hazards, Process Type, GIS, Morphometric parameters

Kurzfassung

Im Alpenraum wurden Siedlungen häufig auf Mur- und Schwemmkegeln errichtet, weshalb sie den Naturgefahren aus dem darüber liegenden Einzugsgebiet ausgesetzt sind. Diesbezügliche Risikobewertungen stützen sich mitunter auf eine Analyse der morphologischen Merkmale der Kegel, zumal sie Rückschlüsse auf unterschiedliche Verlagerungsprozesse der Wildbäche und damit Naturgefahrenprozesse erlauben. Für den österreichischen Alpenraum liegen jedoch kaum Studien vor, die einen Zusammenhang zwischen den morphologischen Merkmalen der Kegel und den Verlagerungsprozessen untersuchen. Daher wurden in dieser Arbeit durch die GIS-gestützte Auswertung eines digitalen Geländemodells (Auflösung von 1 x 1 m) zunächst ausgewählte morphometrische Merkmale von Kegeln im Palten- und Pitztal (Österreich) erhoben. Diese wurden anschließend zwischen Einzugsgebieten mit unterschiedlichen dokumentierten Prozessen (Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport einerseits und murartiger Feststofftransport und Murgang andererseits), Einzugsgebieten mit einer unterschiedlichen Ereignisdisposition bezüglich dieser Prozesse (gemessen an der Melton-Zahl des Einzugsgebietes) und den Untersuchungsgebieten verglichen. Es konnte gezeigt werden, dass Kegel, die von murartigen Prozessen geprägt sind, eine geringere Ausdehnung, eine deutlich größere Neigung, eine höhere Schroffheit und eine größere Heterogenität der Kegeloberfläche aufweisen als Kegel, die von fluvialen Prozessen beeinflusst werden. Hinsichtlich der Neigung und Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Kegeloberfläche gibt es einen zusätzlichen Effekt der Eigenschaften der Untersuchungsgebiete. Aufgrund einer Abweichung zwischen der Ereignisdisposition und den dokumentierten Ereignissen waren die Vergleiche nach der Melton-Zahl der Einzugsgebiete weniger deutlich. Schließlich konnte gezeigt werden, dass die Kegel deutlich flacher als die darüberliegenden Gerinne sind, es jedoch keinen abrupten Neigungswechsel an der Kegelspitze gibt.

Schlüsselwörter: Murkegel, Schwemmkegel, Alluvialfächer, Geomorphologie, Verlagerungsprozess, Naturgefahren, Wildbach, GIS, morphometrische Merkmale

Inhaltsverzeichnis

1	Ein	leitung	13
	1.1	Problemstellung	13
	1.2	Zielsetzungen und Fragestellungen	15
2	Un	tersuchungsgebiete	17
	2.1	Paltental	17
	2.1.	1 Lage	17
	2.1.	2 Geologie	17
	2.1.	3 Niederschlag	18
	2.1.	4 Landnutzung	18
	2.1.	5 Prozessregime	18
	2.2	Pitztal	19
	2.2.	1 Lage	19
	2.2.	2 Geologie	19
	2.2.	3 Niederschlag	19
	2.2.	4 Landnutzung	20
	2.2.	5 Prozessregime	20
3	Ma	terial und Methoden	21
	3.1	Datengrundlagen	21
	3.1.	1 Digitales Geländemodell	21
	3.1.	2 Orthofoto	21
	3.1.	3 Ereignisdokumentation	21
	3.1.	4 Gerinnenetz und Einzugsgebiete der WLV	22
	3.2	Literaturrecherche	22
	3.3	Erhebung und Aufbereitung der morphometrischen Merkmale	22
	3.3.	1 Morphometrische Merkmale zur Abgrenzung von Mur- und Schwemmkegeln _	22
	3.3.	2 Auswahl der morphometrischen Merkmale zur Charakterisierung der Mur- und Schwemmkegel	25
	3.3.	3 Analysen im Geoinformationssystem	29
	3.3.	4 Aufbereitung der Daten	35
	3.3.	5 Erstellung der Längs-, Radial- und Querprofile	37
	3.3.	6 Veranschaulichung der Daten	37
	3.4	Statistische Auswertungen	38
4	Erg	jebnisse	40
	4.1	Übersicht über die erhobenen Mur- und Schwemmkegel	40
	4.1.	1 Paltental	40
	4.1.	2 Pitztal	43
	4.2	Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Prozessregime	46
			XI

	4.3	3	Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Untersuchungsgebiet	58
	4.4	4	Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Melton-Zahl des Einzugsgeb	ietes 60
	4.5	5	Vergleich der Neigung der Längsprofile oberhalb der Kegelspitze mit der Neigung unterhalb der Kegelspitze	ung 62
5		Dis	kussion	67
	5.1	1	Vergleich der morphometrischen Merkmale	67
	ł	5.1.	1 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Prozessregime	67
	4	5.1.	2 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Untersuchungsgebiet	69
		5.1.3	3 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Melton-Zahl des Einzugsgebietes	70
	5.2	2	Vergleich der Radial- und Querprofile nach Untersuchungsgebiet und Prozessregime	71
	5.3	3	Referenzwerte zur Klassifikation von Mur- und Schwemmkegeln nach dem Prozessregime	72
	5.4	4	Vergleich der Neigung der Längsprofile oberhalb der Kegelspitze mit der Neigunterhalb der Kegelspitze	ung 75
	5.5	5	Methodische Aspekte	75
6	:	Sch	llussfolgerungen	_ 77
7		Lite	eraturverzeichnis	81
8	•	Tab	ellenverzeichnis	85
9	1	Abk	bildungsverzeichnis	_ 87
A	nh	ang	ј А	89
A	nh	ang	ј В	95
A	nh	ang	J C	99
A	nh	ang	J D	101
A	nh	ang	 ۶ E	103
		-		

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Im Alpenraum werden weite Bereiche der Talböden von Mur- und Schwemmkegeln eingenommen, womit sie wichtige Elemente der alpinen Geomorphologie darstellen und das Landschaftsbild stark prägen.

Mur- und Schwemmkegel werden zu den Alluvialfächern gezählt, welche charakteristische, deutlich kegelförmige fluviale Ablagerungsformen sind, die sich in der Regel dort bilden, wo ein Gerinne mit hoher Strömungskraft aus einem gefällsreichen, gebirgigen Einzugsgebiet in ein Haupttal bzw. eine Ebene mit reduziertem Gefälle mündet und dabei infolge einer reduzierten Fließgeschwindigkeit einen Teil seiner Fracht verliert (Slaymaker 2004, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013, Ahnert 2015). Eine für die Sedimentation der Fracht verantwortliche Abnahme der Schleppkraft des Gerinnes kann jedoch auch aus einer lateralen Expansion des Abflusses infolge des Wegfallens seitlicher Begrenzungen beim Austritt des Gerinnes aus dem Sammelgebiet (sogenannter "unconfined flow") resultieren (Busche et al. 2005, Blair und PcPherson 2009, Gutiérrez 2013).

Laut Bergmeister et al. (2009) sind Mur- und Schwemmkegel von nicht fluvialen Ablagerungsformen, wie Sturz- und Schuttkegel zu unterscheiden. Letztere werden durch gravitative Prozesse (Felssturz und Steinschlag) gebildet und können gemeinsam mit den Mur- und Schwemmkegeln den Ablagerungskegeln zugerechnet werden. Blair und McPherson (2009) fassen durch fluviale und gravitative Prozesse gebildete Ablagerungskegel zu den sogenannten Alluvialfächern ("alluvial fans") zusammen.

Außerhalb des alpinen und periglazialen Verbreitungsgebietes kommen Alluvialfächer auch in arktischen, humid temperierten, humid tropischen, ariden und semi-ariden Gebieten und damit in allen Klimaten der Erde vor (Slaymaker 2004, Harvey et al. 2005, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013). Dabei liegt ein Verbreitungsschwerpunkt in semi-ariden Gegenden und im Hochgebirge, u.a. in den Alpen (Leser 2003, Zepp 2017).

Aufgrund der im Vergleich zur Umgebung erhöhten Lage und dem damit verbundenen, im Vergleich zum Haupttal geringeren Hochwasserrisiko, wurden Siedlungen in den Alpen bevorzugt auf Alluvialfächern errichtet bzw. wurden und werden Alluvialfächer für damit verbundene Zwecke genutzt (Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Busche et al. 2005, Ahnert 2015). Zumal auf solchen Standorten jedoch ein erhöhtes Risiko besteht, von Naturgefahrenprozessen aus dem darüberliegenden Einzugsgebiet betroffen zu sein (Jackson et al. 1987), beschäftigen sich aktuelle, angewandte Forschungsarbeiten besonders mit den auf Alluvialfächern tatsächlich bzw. potenziell auftretenden Naturgefahrenprozessen und einer diesbezüglichen Risikobewertung (siehe z.B. Wilford et al. 2004, Welsh und Davies 2011). Harvey et al. (2005) sehen darin auch eine der zentralen Herausforderungen hinsichtlich der zukünftigen Erforschung von Alluvialfächern. So unterscheidet z. B. Slaymaker (2004) Kegel, die durch murartige Prozesse und Kegel, die durch fluviale Prozesse geprägt sind. Marchi et al. (1993), Marchi und Tecca (1995) sowie Marchi und Brochot (2000) unterscheiden neben diesen beiden Formen zusätzlich Mischformen zwischen den Prozessen (sogenannte "mixed fans"). In einer ähnlichen Typisierung nach Jackson et al. (1987) erfolgt eine Untergliederung in durch rein fluviale Prozesse, gemischt fluvial und murartige Prozesse sowie gemischt murartige Prozesse und Felssturz geprägte Kegel.

Im Zuge der Untersuchungen dieses Prozessregimes wird neben der Evaluierung dokumentierter, historischer Ereignisse auch auf die Auswertung morphometrischer Größen des Einzugsgebietes und der Kegel zurückgegriffen. Rickenmann (2008) beispielsweise gibt an, dass zur groben Unterscheidung zwischen den Prozessen Murgang und Geschiebetransport und damit zur Beurteilung der Murfähigkeit eines Wildbaches neben der

Interpretation der morphometrischen Charakteristika des Einzugsgebietes auch eine Interpretation der Morphologie des Ablagerungskegels hilfreich sein kann.

In der Fachliteratur gibt es eine Reihe von Aussagen bezüglich allgemeiner Zusammenhänge zwischen den im Einzugsgebiet oder auf dem Kegel auftretenden Verlagerungsprozessen und der Gestalt des Mur- bzw. Schwemmkegels. So unterscheiden verschiedene Autoren beispielsweise zwischen flacheren Schwemmfächern und steileren Murkegeln (Busche et al. 2005, Ahnert 2015) bzw. kegelmantelförmigen Schotter- oder Schwemmkegeln und flacheren Schotter- oder Schwemmfächern (Leser 2003, Zepp 2017). Laut Kostaschuk et al. (1986) wird die Morphologie eines Kegels sehr stark von den Ablagerungsprozessen beeinflusst, welche welche der Art auf diesem stattfinden und mit des vorherrschenden Massenverlagerungsprozesses zusammenhängen. Zu diesem Schluss kommen auch Marchi und Tecca (1995), welche einen beobachteten Zusammenhang zwischen der Melton-Zahl der Sammelgebiete und der Neigung der Kegel auf eine von der Melton-Zahl der Sammelgebiete abhängigen Prädisposition für unterschiedliche Transportprozesse zurückführen (die Melton-Zahl eines Einzugsgebietes ist der Quotient aus der Höhendifferenz zwischen dem höchsten und tiefsten Punkt im Einzugsgebiet und der Wurzel der Einzugsgebietsfläche).

Etwa seit den 1970er-Jahren wurden in unterschiedlichen Regionen der Erde zudem vermehrt Studien zur gezielten Untersuchung des Zusammenhanges zwischen den im Einzugsgebiet oder auf dem Kegel auftretenden Verlagerungsprozessen und der morphologischen Beschaffenheit des Mur- bzw. Schwemmkegels und des zugehörigen Sammelgebietes durchgeführt. Demnach spiegelt die Kegelmorphologie die morphologischen und geologischen Sammelgebiet sowie unterschiedliche Bedingungen im Verlagerungsund Sedimentationsprozesse wider. Während von Murprozessen geprägte Kegel in der Regel ein vergleichsweise kleines Sammelgebiet mit hoher Schroffheit (hohe Melton-Zahl) sowie steile Ablagerungen mit einer geringen Ausdehnung besitzen, weisen Kegel, die von fluvialen Prozessen geprägt sind, flachere Ablagerungen mit einer größeren Ausdehnung sowie größere Sammelgebiete mit einer geringeren Schroffheit auf (siehe z. B. Kostaschuk et al. 1986, Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Marchi und Brochot 2000, Wildford et al. 2004, Harvey et al. 2005, Welsh und Davies 2011, Gutiérrez 2013). Eine Abminderung dieser Beziehungen durch sekundäre Veränderungen am Kegel sowie unterschiedliche Lithologien im Sammelgebiet ist jedoch möglich (Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995). Zudem sind Kegel, die von Murprozessen geprägt sind, durch lappenartige Strukturen, Leveès und im Allgemeinen grobe Ablagerungen gekennzeichnet, wodurch sie eine vergleichsweise große Heterogenität der Oberfläche aufweisen (Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993). Laut Blair und McPherson (2009) kann sich die Rauigkeit der Oberfläche neben der Oberflächengestaltung durch primäre (aufbauende) Prozesse (wie z. B. Murgang) jedoch auch aus der nachträglichen Veränderung der Kegeloberfläche durch sekundäre Prozesse (wie z. B. Rillenbildung durch Erosion) ergeben.

Aus diesen Beziehungen zwischen der morphologischen Beschaffenheit der Kegel und dem darauf vorherrschenden Prozessregime schließen Marchi et al. (1993) sowie Marchi und Tecca (1995), dass insbesondere Parameter wie die Kegelneigung und die Melton-Zahl des Sammelgebietes zur Identifikation der Verlagerungsprozesse, die für die Kegelentwicklung verantwortlich sind, geeignet sind. Auch Blair und McPherson (2009) weisen in ihrer prozessund texturbezogenen Klassifizierung den unterschiedlichen Kegeltypen jeweils einen charakteristischen Gefällsbereich zu. Die Melton-Zahl des Einzugsgebietes wird auch von Wilford et al. (2004) sowie von Welsh und Davies (2011) zur Typisierung von Einzugsgebieten bzw. Kegeln, die von unterschiedlichen Prozessen beeinflusst werden, herangezogen. Dieser an einer spezifischen Ausprägung eines morphometrischen Merkmales orientierte Klassifikationsansatz wird mitunter jedoch auch kritisiert (siehe z.B. Harvey et al. 2005).

Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Studien beziehen sich zumeist auf Untersuchungsregionen in Nordamerika (siehe z.B. Kostaschuk et al. 1986, Jackson et al. 1987 und Wilford et al. 2004), in Europa liegen auch einige Untersuchungen für den Alpenraum

vor. Diese wurden vorwiegend in den italienischen Ostalpen und französischen Westalpen durchgeführt (siehe z.B. Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Marchi und Brochot 2000). Speziell für den österreichischen Alpenraum, wo Schwemm- und Murkegel ein prägendes Landschaftsbild darstellen und daher häufig besiedelt sind bzw. Standorte für wirtschaftliche Tätigkeiten darstellen, liegen jedoch nur wenige Studien vor (siehe z. B. Brauner 1996), welche einerseits Schwemm- und Murkegel einer morphometrischen Analyse unterziehen und andererseits die Morphologien der Kegel mit den vorherrschenden Prozessen bzw. den Einzugsgebietsparametern, welche die Disposition hinsichtlich der Naturgefahrenprozesse beeinflussen, in Verbindung bringen.

Zudem wurden die meisten bekannten Studien auf der Grundlage topographischer Karten mit Maßstäben im Bereich zwischen 1:10.000 und 1:50.000 durchgeführt (Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Marchi und Brochot 2000), was eine Genauigkeit der Betrachtungen im Bereich von 10 bis 50 m unterstellt. Die Technologie des Airborne Laserscannings (ALS) ermöglicht heutzutage die Ableitung von digitalen Geländemodellen (DGMs) mit räumlichen Auflösungen im Dezimeter-Bereich. In Verbindung mit einer durch Geoinformationssysteme unterstützten Auswertung, erlauben es diese technologischen Fortschritte in der Fernerkundung, heutzutage morphometrische Untersuchungen auf einem wesentlich detaillierteren Skalenniveau sowie in methodisch umfangreicherem Ausmaß durchzuführen.

1.2 Zielsetzungen und Fragestellungen

Auf Grundlage der Problemstellung, welche für den österreichischen Alpenraum einen Bedarf an morphometrischen Untersuchungen von Mur- und Schwemmkegeln in Zusammenhang mit dem vorherrschenden Prozessregime aufzeigt und auf die methodischen Möglichkeiten hinweist, die sich durch die technologischen Entwicklungen in der Fernerkundung ergeben, können für die vorliegende Arbeit zwei Zielsetzungen formuliert werden. In erster Linie sollen durch die systematische Analyse eines digitalen Geländemodells mit hoher räumlicher Auflösung (1 x 1 m) mit Hilfe eines Geoinformationssystems morphometrische Merkmale von Mur- und Schwemmkegeln in zwei unterschiedlichen Regionen erhoben und dokumentiert werden, um eine Datengrundlage für weitere Untersuchungen zu schaffen. In einem weiteren Schritt soll schließlich überprüft werden, inwiefern diese morphometrischen Merkmale Rückschlüsse auf das Prozessregime (murartiger Feststofftransport und Murgang einerseits und fluviatiler Feststofftransport und Hochwasser andererseits) zulassen. Hierbei soll das Prozessregime sowohl durch die im Rahmen der Ereignisdokumentation des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) dokumentierten Ereignisse, als auch durch die Prädisposition für gewisse Prozesse, welche sich - wie bereits in der Problemstellung erläutert – aus den Einzugsgebietscharakteristika ableiten lassen, charakterisiert werden. Diese Charakterisierung des Prozessregimes anhand der Prädisposition soll in der vorliegenden Arbeit nach dem von Heiser et al. (2015) für die österreichischen Alpen entwickelten Modell zur Vorhersage des dominierenden Wildbachprozesses in steilen Einzugsgebieten erfolgen. Dieses Modell verwendet unter anderem die Melton-Zahl des Sammelgebietes zur Vorhersage von unterschiedlichen Verlagerungsprozessen. Während das Modell für Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl von kleiner 0,69 fluviale Prozesse (Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport) vorhersagt, wird für Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl höher als 0,69 der Prozess Murgang vorhergesagt.

Die Untersuchungen sollen sich im Rahmen dieser Arbeit auf die beiden Täler "Pitztal" in Tirol sowie "Paltental" in der Steiermark beschränken. Zum einen ist dies vor dem Hintergrund der Bewältigung des Arbeitsaufwandes im Rahmen dieser Arbeit zu sehen. Zum anderen wurden speziell diese beiden Einzugsgebiete ausgewählt, weil sie sich laut Ereignisdokumentation hinsichtlich des Prozessregimes (Feststofftransport) deutlich unterscheiden. Während im Pitztal im Zuge der Ereignisdokumentation vorwiegend murartiger Feststofftransport und Murgänge dokumentiert wurden, überwiegt im Paltental der fluviatile Feststofftransport.

Konkret soll in dieser Arbeit folgenden Fragestellungen nachgegangen werden:

- 1. Anhand welcher Merkmale lassen sich Schwemm- und Murkegel in einem digitalen Geländemodell identifizieren und welche Teileinzugsgebiete weisen in den Untersuchungsgebieten laut diesen Kriterien Mur- bzw. Schwemmkegel auf?
- 2. Welche morphometrischen Indikatoren können zur Charakterisierung von Mur- und Schwemmkegeln aus einem digitalen Geländemodell abgeleitet werden und wie sind diese in den identifizierten Mur- und Schwemmkegeln ausgeprägt?
- 3. Unterscheiden sich die Indikatoren zur Charakterisierung der Kegelmorphologie bzw. die morphometrischen Merkmale zwischen
 - a) Teileinzugsgebieten mit unterschiedlichen Prozessen laut Ereignisdokumentation (Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport einerseits und murartiger Feststofftransport und Murgang andererseits)?
 - b) den beiden Untersuchungsgebieten (Pitztal und Paltental), in welchen laut Ereignisdokumentation ein unterschiedliches Prozessregime (vorwiegend fluviatiler Feststofftransport vs. vorwiegend murartiger Feststofftransport und Murgang) vorherrscht?
 - c) Teileinzugsgebieten unterschiedlicher Charakteristika, welche die Prädisposition hinsichtlich der auftretenden Prozesse beeinflussen (d.h. Teileinzugsgebieten mit Melton-Zahlen größer bzw. kleiner als 0,69)?
- 4. Lassen die festgestellten Unterschiede der morphometrischen Merkmale der Kegel in Hinblick auf das Prozessregime eine Klassifikation der Kegel nach dem Prozessregime anhand morphometrischer Merkmale zu?
- 5. Geht der Beginn der Ablagerungen mit einer deutlichen Gefällsminderung einher?

2 Untersuchungsgebiete

2.1 Paltental

2.1.1 Lage

Das Paltental befindet sich im Nordwesten der Steiermark und ist ein Seitental des oberen Ennstales (siehe Abbildung 1). Es verläuft vom Schoberpass (849 m) in südöstliche Richtung nach Selzthal (636 m) und wird von der Palten durchflossen, die nordöstlich von Selzthal in die Enns mündet. Zusammen mit dem Liesingtal, das sich dem Paltental südöstlich des Schoberpasses anschließt, bildet es über die Pyhrn-Autobahn und die Bahnstrecke Linz-Selzthal-Graz die Nord-Südost-Verbindung zwischen dem Enns- und Murtal. Von Nordwesten nach Südosten liegen die Ortschaften Selzthal, Rottenmann, Boder, Büschendorf, Edlach, Bärndorf, Sankt Lorenzen im Paltental, Trieben, Gaishorn am See, Treglwang und Furth, wobei Rottenmann und Trieben die Hauptorte sind (AEIOU 2016, EnnstalWiki 2018).



Abbildung 1: Überblick über die Lage und Ausdehnung der Untersuchungsgebiete.

2.1.2 Geologie

In geologischer Hinsicht ist das Paltental vorwiegend vom ostalpinen Paläozoikum (Grauwackenzone, Gurktaler Decke, u.a.) geprägt, welches im südwestlichen Bereich des Tales an das ostalpine Kristallin und das zentralalpine Permomesozoikum grenzt. Nordöstlich des Paltentales grenzt das ostalpine Paläozoikum an die nördlichen Kalkalpen. Zum ostalpinen Paläozoikum gehören die jungpaläozoischen Gesteine (Schiefer, Sandstein, Konglomerat und Karbonat), welche die nördöstliche Seite des inneren Paltentales, einen Teil des Talbodens und einen kleineren Abschnitt südwestlich von St. Lorenzen aufbauen (GBA

2013). Hammer (s.a.) spricht hierbei von graphitreichen Schiefern und Konglomeraten, begleitet von Kalken und Grünschiefern, welche die sonnseitigen Talhänge einnehmen. Auch zu dieser Gruppe gezählt werden die altpaläozoischen Gesteine (Phyllit, Schiefer, Grauwacke), welche die südwestliche Seite des inneren Paltentales und die obere Hangzone der nordöstlichen Talseite im äußeren Paltental sowie einen Teil des Talbodens aufbauen. Zudem wird auch der Blasseneck-Porphyroid, welcher in dieser Zone selten eingeschaltet ist und speziell im Paltental im obersten Teil des Einzugsgebietes oberhalb des Schoberpasses auftritt, zum ostalpinen Paläozoikum gezählt. Die Gruppe des ostalpinen Kristallins ist auf der südwestlichen Talseite des äußeren Paltentales durch Paragneise und jungpaläozoische Orthogneise vertreten. An diese grenzen im Südwesten und im hinteren Bereich des Tales südöstlich von Trieben Karbonatgesteine, Siliziklastika und Porphyroide des zentralalpinen Permomesozoikums an (GBA 2013).

2.1.3 Niederschlag

Im Paltental liegt der mittlere Jahresniederschlag (interpolierte Messstellenwerte, die unter Berücksichtigung von Seehöhe und lokalen Besonderheiten korrigiert wurden) zwischen 1000 und 1499 mm (BMNT 2018a). Die Klimamittelwerte für die Periode 1981-2010 der nahe gelegenen Messstation Admont zeigen einen mittleren Jahresniederschlag von 1295 mm mit Sommermaximum, einen absoluten jährlichen Höchstwert der täglichen einem Niederschlagssumme von 83 mm und eine mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit Gewitter von (ZAMG 23 2012). Die aus MaxModNund ÖKOSTRA-Werten errechneten Bemessungsniederschläge für ein Ereignis mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 100 Jahren betragen für das Pitztal im Mittel (Mittelwert der Gitterpunkte mit Maschenweite 6 x 6 km, die in das Paltental fallen) für das 60-Minütige Ereignis 81 mm, für das eintägige Ereignis 168 mm und für das dreitägige Ereignis 223 mm (BMNT 2018b).

2.1.4 Landnutzung

Laut den Fernerkundungsdaten aus dem Projekt CORINE Landcover für das Aufnahmejahr 2006 wird dem Talboden des Haupttales und jenem der Nebentäler vorwiegend die Landbedeckungs- und Landnutzungsform Wiese und Weide zugewiesen. Im Talboden des Haupttales werden seltener auch landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Vegetation von signifikanter Größe und Weinbauflächen ausgewiesen. Lokal kommen auch Gebiete mit nicht durchgängiger städtischer Prägung vor. Auf den Talhängen stockt vorwiegend Nadelwald, selten findet man auch Fragmente mit Mischwald und Wald/Strauch-Übergangsstadien. Oberhalb des Waldes schließt sich ein schmaler Gürtel mit Heiden und Moorheiden und natürlichem Grünland an. In hohen Lagen werden nur sehr selten und lokal begrenzt Flächen mit spärlicher Vegetation und Felsflächen ohne Vegetation ausgewiesen (EEA 2016).

2.1.5 Prozessregime

Laut der Ereignisdokumentation des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung tritt im Paltental nahezu ausschließlich der Verlagerungsprozess fluviatiler Feststofftransport auf. Die Prozesse Hochwasser, murartiger Feststofftransport und Murgang wurden hingegen nur selten dokumentiert.

2.2 Pitztal

2.2.1 Lage

Das Pitztal ist ein etwa 40 km langes Tal im Südwesten von Tirol, das von Süden nach Norden verläuft und von der Pitze entwässert wird, welche südlich von Imst in das Inntal mündet (siehe Abbildung 1). Westlich grenzt das Einzugsgebiet an das Kaunertal, während es östlich an das Ötztal grenzt. Im Süden bilden Gletscher den Talschluss. Politisch gliedert sich das Pitztal in die Gemeinden Arzl im Pitztal beim Talausgang, Wenns und Arzl im äußeren Talabschnitt und St. Leonhard im inneren Talabschnitt. Im äußeren Abschnitt bei Arzl und Wenns weist das Tal aufgrund der ausgeprägten Talterrassen Mittelgebirgscharakter auf. Zwischen den Ortschaften Jerzens und Zaunhof verengt es sich zu einem Kerbtal, ehe es sich weiter nach Süden hin bei St. Leonhard wieder aufweitet. Aufgrund der steilen Hänge und Gräben, welche den Talboden umgeben, herrscht im Pitztal ein hohes Potenzial für Naturgefahren. Während der hintere Talabschnitt mit den Skigebieten am Hochzeiger, Rifflsee und am Pitztaler Gletscher vorwiegend von Tourismus geprägt ist, spielt die Landwirtschaft nur im äußeren Tal eine nennenswerte Rolle (Abteilung Landesentwicklung und Zukunftsstrategie 2018).

2.2.2 Geologie

In geologischer Hinsicht durchschneidet das Pitztal den nördlichen Bereich des sogenannten Ötztal-Stubai-Komplexes, der ein ostalpines Deckensystem darstellt. Im Bereich des Pitztales liegt ein Großfaltenbau mit ungefähr in Ost-West-Richtung streichenden horizontalen Faltenachsen vor. Diese Hauptmasse des Ötztal-Stubai-Komplexes besteht aus hochkristallinen Schiefern bzw. sogenannten Altkristallingesteinen, deren Hauptgesteine vorwiegend Paragneise (Biotitplagioklasgneise und Gneisglimmerschiefer) und mineralreiche Glimmerschiefer sind, in welche auch Orthogneise, Amphibolite und selten Eklogite eingelagert sein können. Vereinzelt können auch Quarzite und Diabasgänge eingeschaltet sein (Schmidegg 1964, Rode 2008, Krainer 2010). Speziell im Pitztal findet man vorwiegend Paragneis und Glimmerschiefer vor. Der mittlere Talabschnitt ist von Amphibolit durchzogen. Südlich der in etwa rechtwinkeligen Richtungsänderung des Talverlaufes sind Muskowitgranit und zweiglimmriger Augengneis eingelagert, während nördlich davon auf der linksufrigen Talseite Quarzphyllit und Phyllitgneise vorkommen. In der südlichen Hälfte des Tales sind immer wieder Lagen mit Biotitgranitgneis und Tonalitgneis eingeschaltet (Schmidegg 1964). Die Morphologie der Landschaft wurde wesentlich durch die eiszeitliche Vergletscherung geprägt. Während der letzten Eiszeit wurde die Eisoberfläche lediglich von den höchsten Gipfeln und Graten überragt. Nach dem Abschmelzen der Eismassen prägten Massenbewegungen wie Hangrutschungen und Bergstürze den Talboden (Krainer 2010).

2.2.3 Niederschlag

Im äußeren Pitztal liegt der mittlere Jahresniederschlag (interpolierte Messstellenwerte, die unter Berücksichtigung von Seehöhe und lokalen Besonderheiten korrigiert wurden) zwischen 700 und 999 mm, im inneren Pitztal zwischen 1000 und 1499 mm (BMNT 2018a). Die Klimamittelwerte für die Periode 1981-2010 der Messstation St. Leonhard zeigen einen mittleren Jahresniederschlag von 832 mm mit einem Sommermaximum, einen absoluten jährlichen Höchstwert der täglichen Niederschlagssumme von 84 mm und eine mittlere jährliche Anzahl an Tagen mit Gewitter von sieben. Für die Station der nahe gelegenen Stadt Imst beläuft sich der mittlere Jahresniederschlag auf 794 mm mit einem Sommermaximum und der absolute jährliche Höchstwert der täglichen Niederschlagssumme auf 85 mm (ZAMG 2012). Die aus MaxModN- und ÖKOSTRA-Werten errechneten Bemessungsniederschläge für ein Ereignis mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von 100 Jahren betragen für das Pitztal im Mittel (Mittelwert der Gitterpunkte mit Maschenweite 6 x 6 km, die in das Pitztal fallen) für

das 60-Minütige Ereignis 53 mm, für das eintägige Ereignis 145 mm und für das dreitägige Ereignis 183 mm (BMNT 2018b).

2.2.4 Landnutzung

Laut den Fernerkundungsdaten aus dem Projekt CORINE Landcover für das Aufnahmejahr 2006 werden der Talboden und in der Nähe des Talausganges auch die Hänge als Wiesen und Weiden genutzt. Die Hänge sind zumeist mit Nadelwald bedeckt, die tiefer gelegenen Hangzonen im nördlichen Bereich außerdem auch mit Laub- und Mischwäldern. Oberhalb des Waldgürtels schließt sich natürliches Grünland an, das nach oben hin in Flächen mit spärlicher Vegetation und schließlich Felsflächen ohne Vegetation übergeht. Im hinteren (südlichen) Bereich des Tales befinden sich oberhalb der Felsflächen Gletscher bzw. Dauerschneegebiet. Der mit Vegetation bedeckte Anteil der Fläche nimmt in Richtung des Talausgangs zu, hier kommen lokal auch Gebiete mit nicht durchgängiger städtischer Prägung vor (EEA 2018).

2.2.5 Prozessregime

Laut der Ereignisdokumentation des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung tritt im Pitztal vorwiegend der Verlagerungsprozess Murgang auf. Deutlich seltener wurden die Prozesse murartiger und fluviatiler Feststofftransport sowie Hochwasser dokumentiert.

3 Material und Methoden

3.1 Datengrundlagen

3.1.1 Digitales Geländemodell

Die Geländeinformationen wurden einem Geländemodell mit Auflösung 1 x 1 m entnommen. Dieses wurde vom Institut für Alpine Naturgefahren der Universität für Bodenkultur Wien als Rasterdatei im TIFF-Format in der Projektion MGI Austria Lambert zur Verfügung gestellt.

3.1.2 Orthofoto

Die Orthofotos für das Paltental wurden über das **BMNT-Kundenportal** (https://kunden.bmnt.lfrz.at/, verfügbar auch unter https://www.data.gv.at/katalog/dataset/254757be-69ef-4a6c-a4c1-1432815d7522) bezogen, während die Orthofotos für das Pitztal über die Open Government Data des Landes Tirol (https://www.data.gv.at/katalog/dataset/35691b6c-9ed7-4517-b4b3-688b0569729a) bezogen wurden. In beiden Fällen wurden die Daten als Online-Ressource zur Verfügung gestellt und über einen WMS-Dienst (Web-Map Service) in das Geoinformationssystem eingebunden. Die Orthofotos wurden von Geoimage-Austria mit einer Bodenauflösung von 20 cm erstellt und betreffen im Paltental den Aufnahmezeitraum 2016, im Pitztal den Aufnahmezeitraum 2015. Geoimage Austria ist eine Kooperationsplattform zwischen den Ländern und dem Bund (vertreten durch das BMNT [Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus] und das LFRZ [Land-, forst- und wasserwirtschaftliches Rechenzentrum GmbH]) (APA-OTS Originaltext-Service GmbH 2011, BMNT 2018c, Geoland.at 2018, Geoimage Austria 2018, Land Tirol 2018, Geoimage Austria 2019).

3.1.3 Ereignisdokumentation

Die Angaben zu den Prozessen, welche im Sammelgebiet oberhalb eines Kegels oder auf dem Kegel auftreten, wurden der Ereignisdokumentation des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung entnommen. Diese Daten wurden vom Institut für Alpine Naturgefahren der Universität für Bodenkultur Wien als Shape-Dateien im Koordinatensystem MGI Austria Lambert zur Verfügung gestellt. Hierin sind einzelne Ereignisse anhand von Punkten, welche am Ereignisort oder – ohne den exakten Ereignisort zu beschreiben – innerhalb des Teileinzugsgebietes gesetzt wurden, dokumentiert. Das Prozessregime wird dabei durch das jeweils zugewiesene Attribut Prozessart beschrieben. In der vorliegenden Arbeit war ausschließlich dieses Attribut von Relevanz. Weiters wurden nur die Verlagerungsprozesse in Wildbächen (Hochwasser, fluviatiler Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Murgang) betrachtet.

Die Ereignisdokumentation erfolgt durch die MitarbeiterInnen des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung, welche die Ereignisse, die im Zuständigkeitsbereich des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung liegen, in den digitalen Wildbach- und Lawinenkataster (WLK) eintragen. Dabei erfolgt eine Dokumentation von Prozessen in Wildbächen sowie von gravitativen Massenbewegungen, welche den vier Kategorien Wasser, Lawine, Rutschung und Steinschlag zugeordnet werden. Weiters werden die Wildbachprozesse in die vier Verlagerungsprozesse Hochwasser, fluviatiler Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Murgang sowie die gravitativen Massenbewegungen in die Prozessarten Sturzprozess, Fließ- und Gleitprozess aufgeteilt. Die Eigenschaften der charakteristischer Verlagerungsprozesse in Wildbächen laut ONR 24800 sind in Tabelle 1 angeführt. Darüber hinaus wird im Zuge der Ereignisdokumentation auch das

Auslöseereignis (z. B. Starkregen, Gewitter, Hagel, u.s.w.), das Datum und die Intensität (gering, mittel, stark, extrem) des Ereignisses erhoben sowie eine Zuordnung in Hinblick auf die Kategorien Einzugsgebiet, Ort, Gemeinde, Bezirk und Bundesland vorgenommen (BMLFUW 2017).

Verlagerungstyp	Hochwasser	Hochwasser	Mure	Mure
Verlagerungsart	fluviatil	fluviatil	murartig	murartig
Verlagerungsprozess	Hochwasser	fluviatiler Feststofftransport	murartiger Feststofftransport	Murgang
Prozesstyp	Reinwasserabfluss	schwacher Feststofftransport	starker Feststofftransport	Murgang
Fließverhalten	newtonisch	newtonisch	annähernd newtonisch	nicht newtonisch
Vol. Feststoff- konzentration cv (Bereich)	Promille- bereich	0 % bis 20 %	20 % bis 40 %	> 40 %
Größtkorn	mm bis cm	bis dm	bis m	bis m
Dichte (Bereich)	1.000 kg/m³	< 1.300 kg/m³	1.300 kg/m³ bis 1.700 kg/m³	> 1.700 kg/m ³

Tabelle	1:	Übersicht	über	die	Eigenschaften	charakteristischer	Verlagerungsprozesse	in
Wildbächen laut ONR 24800 (übernommen aus BMLFUW 2017, S. 7).								

3.1.4 Gerinnenetz und Einzugsgebiete der WLV

Die Kartierungen des Gerinnenetzes sowie der Einzugsgebiete, welche in die Zuständigkeit des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung fallen, wurden vom Institut für Alpine Naturgefahren der Universität für Bodenkultur Wien als Shape-Dateien im Koordinatensystem MGI Austria Lambert zur Verfügung gestellt.

3.2 Literaturrecherche

Die Literatursuche wurde unter anderem auf Grundlage von bereits vorhandenem Material (Lehrveranstaltungsunterlagen der Universität für Bodenkultur, bereits bekannte wissenschaftliche Publikationen, persönliche Mitteilungen) durchgeführt, indem relevante Aspekte durch zusätzliche Recherchen vertieft wurden. So konnten beispielsweise die Literaturangaben wissenschaftlicher Publikationen als Verweis zu relevanten Informationsquellen herangezogen werden. Neben wissenschaftlicher Literatur wurde auch auf praktische Informationen zurückgegriffen. Als Suchinstrument diente daher neben den wissenschaftlichen Suchplattformen Google Scholar, Scopus und der Recherche-Plattform "BOKU:LITsearch" der Bibliothek der Universität für Bodenkultur auch die allgemeine Suchmaschine Google. Alle verwendeten Hardcopys wurden der Bibliothek der Universität für Bodenkultur entliehen.

3.3 Erhebung und Aufbereitung der morphometrischen Merkmale

3.3.1 Morphometrische Merkmale zur Abgrenzung von Mur- und Schwemmkegeln

Das Auffinden sowie die Auswahl von Kegeln, welche für die Analysen im Rahmen dieser Arbeit als geeignet erachtet wurden, erfolgte auf systematische Weise, wobei sowohl die in diesem Kapitel ausgeführten Literaturangaben als auch die spezielle Aufgabenstellung dieser Arbeit, welche u. a. die Untersuchung eines Zusammenhanges zwischen den morphometrischen Merkmalen von Kegeln und den darauf vorherrschenden Prozessen zum Ziel hat, als Orientierung dienten. Diese Arbeitsschritte erfolgten – so wie alle mit der Datenerfassung verbundenen Arbeitsschritte im Rahmen dieser Arbeit – unter Anwendung eines Geoinformationssystems und auf Grundlage von Orthofotos sowie eines hoch aufgelösten digitalen Geländemodells (1 x 1 m) und daraus abgeleiteter räumlicher Informationen (Neigungsraster und Höhenlinien). Die Aufbereitung der Datengrundlagen sowie der genaue Hergang der Identifikation und der Abgrenzung der Kegel sind weiter unten beschrieben. Im folgenden Abschnitt soll ein kurzer Überblick über die in der Fachliteratur am häufigsten verwendeten Merkmale zur Identifikation und Abgrenzung von Mur- und Schwemmkegeln gegeben werden.

Die in der Literatur erläuterten Merkmale, welche zum Auffinden von Mur- und Schwemmkegeln auf einer topografischen Karte dienen, können grob in zwei Kategorien aufgegliedert werden. Einerseits bilden sich Kegel an charakteristischen Punkten im Gelände aus, weshalb in einem ersten Schritt die Lage als Kriterium zur Eingrenzung des Raumes, in welchem sich potenziell Kegel ausbilden, herangezogen werden kann. Andererseits weisen Kegel charakteristische, konstituierende Elemente und allgemeine geomorphologische Formen (z. B. Grundriss der Ablagerungen) auf, welche in einem zweiten Schritt zur Identifikation der Ablagerungsformen dienen können. Die Abgrenzung von umgebenden, angrenzenden Landschaftsformen kann schließlich anhand der Ausprägung allgemeiner morphologischer Merkmale, wie etwa anhand von Neigungswechseln bzw. Knickpunkten, vorgenommen werden.

Ein fundamentales Lagekriterium für alpine Regionen ist die Mündung eines Nebentales mit steilem und gebirgigem Charakter in ein flacheres Haupttal bzw. eine Ebene (Leser 2003, Slaymaker 2004, Harvey et al. 2005, Bergmeister et al. 2009, Blair und McPherson 2009, Ahnert 2015, Zepp 2017). Zumal diese Bereiche meist breiter sind, liegt ausreichend Platz für die Sedimentation vor (Slaymaker 2004). Durch die Ablagerungen im Mündungsbereich kann das Gerinne des Haupttales an die gegenüberliegende Talseite gedrängt werden (Leser 2003, Busche et al. 2005).

Die charakteristischen Elemente, welche am Aufbau von Alluvialfächern beteiligt sind, werden von Blair und McPherson (2009) als konstituierende Morphologie zusammengefasst. Einen Überblick über die wichtigsten Bestandteile gibt Abbildung 2. Vom Bereich des Überganges zwischen Sammel- und Ablagerungsgebiet breiten sich die Ablagerungen nach unten hin kegelförmig aus. Der Ursprung der Ablagerungen im oberen (proximalen) Bereich ist punktförmig und wird als Kegelspitze bezeichnet. Finden Ablagerungen aufgrund eines hohen Geschiebeangebotes bereits im unteren Bereich des Sammelgebietes statt, bildet sich ein aus. Bei verminderter Geschiebenachlieferung und damit Kegelhals aerinaeren Feststoffkonzentrationen des Abflusses kann sich das Gerinne im proximalen Bereich eintiefen (daher dort seitlich begrenzter Abfluss), bis es am sogenannten Verschneidepunkt zwischen Gerinnesohle und Kegeloberfläche (meist im mittleren Kegelbereich) aufgrund des Wegfallens seitlicher Begrenzungen wieder oberflächenhaft abfließt, wodurch auch laterale Fließrichtungen möglich sind. Unterhalb des Verschneidepunktes, bzw. bei fehlendem eingetieften Gerinneabschnitt unterhalb der Kegelspitze, befindet sich der aktive (rezente) Ablagerungsbereich, welcher vom inaktiven (fossilen) Ablagerungsbereich unterschieden wird. Durch Ablagerungen innerhalb des eingetieften Gerinnes kann es auch zu Ausbrüchen und der Ausbildung mehrerer Gerinneäste kommen (siehe z. B. de Haas et al. 2018). Im unteren (distalen) Kegelbereich können die Ablagerungen durch rückschreitende Erosion zerschnitten werden. Mündet das Kegelgerinne nicht direkt am Kegelfuß in den Vorfluter, so bildet sich zwischen Kegelfuß und Vorfluter der sogenannte Tallauf aus (Busche et al. 2005, Bergmeister et al. 2009, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013).



Abbildung 2: Zentrale konstituierende Elemente, aus denen sich ein Alluvialfächer zusammensetzt. FC = Zubringergerinne, A = Kegelspitze am Übergang des Sammel- zum Ablagerungsgebiet, IC = eingetieftes Gerinne (in Abhängigkeit der vorherrschenden Prozesse ausgeprägt oder nicht vorhanden), IP = Verschneidepunkt zwischen Gerinne und Kegeloberfläche (nur bei Vorhandensein eines eingetieften Gerinnes), ADL = aktiver Ablagerungsbereich. Man beachte die Lage am Gebirgsfuß (aus Blair und McPherson 1994, S. 475).

Auch die allgemeine Kegelmorphologie (laut Blair und McPherson [2009] als "composite morphology" bezeichnet) gibt Hinweise auf das Auftreten von Mur- und Schwemmkegeln. Hier kann vor allem der halbkreisförmige bzw. zumindest kreissektorförmige oder kegelmantelartige bzw. dreieckige Grundriss genannt werden, welcher sich bei frischen Ablagerungen unschwer auf Luftaufnahmen, bei bereits älteren Kegeln anhand der Änderung der Exposition erkennen lässt (Leser 2003, Blair und McPherson 2009, Ahnert 2015). Laut dem Norwegian Water Resources and Energy Directorate (2013) ist die Krümmung der Höhenlinien (Richtungsänderung an einem Wendepunkt) ein geeigneter Indikator für eine solche Änderung der Exposition. Demnach kann eine Abgrenzung von Kegeln in den "Tälchen", wo die Höhenlinien die Richtung ändern, erfolgen. Die Öffnung des Kreissektors kann nahezu 180 ° betragen, liegt jedoch meist im Bereich zwischen 15 und 90 ° (Leser 2003,

Blair und McPherson 2009, Ahnert 2015). Die radialen Längen der Ablagerungen können sich von etwa 50 m bis 60 km erstrecken (Gutiérrez 2013).

Eine Abgrenzung der Kegelformen von angrenzenden Landschaftsformen kann vorwiegend über charakteristische Neigungen bzw. anhand von Neigungswechseln vorgenommen werden. Zumal Mur- und Schwemmkegel dort vorkommen, wo ein steiles Gerinne in eine flache Talsohle übergeht, ist zu vermuten, dass Kegel deutlich flacher als das darüberliegende Gerinne sind (Leser 2003, Bergmeister et al. 2009, Zepp 2017). Blair und McPherson (2009) konnten im Untersuchungsraum Death Valley in Kalifornien jedoch beobachten, dass das Gefälle im unteren Sammelgebiet nur in 40 % der untersuchten Kegel signifikant steiler als im oberen Kegelbereich war. Laut Bergmeister et al. (2009) kann das Gerinne beim Austritt aus dem Sammelgebiet unter Umständen auch eine Steilstufe passieren. Als Abgrenzung im proximalen Bereich zum darüberliegenden Sammelgebiet sollte daher auch die Kegelspitze als punktförmiger Ursprung der Ablagerungen im Betracht gezogen werden. Auch im distalen Bereich kann eine Gefällsänderung als Grenzbedingung für die Ausdehnung des Kegels herangezogen werden. Blair und McPherson (1994) konnten beobachten, dass Alluvialfächer stets steiler als die umgebenden Flusssysteme sind und dass der Übergang zwischen beiden Landschaftsformen hinsichtlich der auftretenden Neigungen diskontinuierlich erfolgt. Während auf Alluvialfächern Neigungen zwischen 1,5 und 25° festgestellt werden konnten, wurden in Flusssystemen meist Neigungen unterhalb von 0,5 ° beobachtet. Zudem kann aufgrund der Ablagerungsprozesse bzw. sekundärer Veränderungen dieser (z. B. Murlappen mit einer steil abfallenden Front, rückschreitende Erosion vom distalen Ende her, Abtragung des Fußes durch den Vorfluter) eine deutliche Abgrenzung des Kegelfußes erkennbar sein. Oft lässt sich eine radiale Begrenzung durch Flüsse oder Seen beobachten (Marchi und Brochot 2000, Slaymaker 2004, Blair und McPherson 2009). Auch zusammengewachsene Kegel (sogenannte "bajadas") sind keine Seltenheit (Busche et al. 2005, Gutiérrez 2013).

3.3.2 Auswahl der morphometrischen Merkmale zur Charakterisierung der Mur- und Schwemmkegel

Die Charakterisierung von Mur- und Schwemmkegeln anhand der GIS-gestützten Erhebung morphometrischer Merkmale in einem digitalen Geländemodell mit Auflösung 1 x 1 m konnte durch die Extraktion von Parametern aus unterschiedlichen Ansichten (Grundriss, Längs- und Queransichten) der Kegel erfolgen. Für ein Verständnis der potenziell auftretenden Verlagerungsprozesse bzw. sekundären Prozesse, welche für die Veränderung der Ablagerungen verantwortlich sind, wurde auch das darüber liegende Sammelgebiet und das umgebende Haupttal in die morphometrische Analyse mit einbezogen. Im folgenden Abschnitt soll ein kurzer Überblick über die in der Fachliteratur am häufigsten verwendeten Merkmale zur Charakterisierung von Mur- und Schwemmkegeln gegeben werden.

Bei Betrachtung des Grundrisses der Kegel wird am häufigsten die Projektionsfläche als morphometrisches Merkmal zur Charakterisierung herangezogen (Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Marchi und Brochot 2000, Leser 2003, Harvey et al. 2005, Bergmeister et al. 2009, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013). Diese kann durch die Dimensionen des Haupttales und durch angrenzende Seen, Flüsse und Kegel begrenzt sein (Marchi und Tecca 1995, Marchi und Brochot 2000, Slaymaker 2004, Blair und McPherson 2009). Marchi et al. (1993) konnten beispielsweise größere Kegel in breiteren Haupttälern beobachten. Auch Marchi und Tecca (1995) konnten in engen Tälern der italienischen Ostalpen eine begrenzte laterale Ausdehnung der Ablagerungen beobachten. Ähnliche Beobachtungen wurden von Marchi und Brochot (2000) in den französischen Alpen gemacht. Ein weiteres Merkmal zur Charakterisierung der Ausdehnung eines Kegels ist aufgrund des halbkreisförmigen bzw. kreissektorförmigen Grundrisses der überstrichene Winkel (Öffnungswinkel) der Projektionsfläche. Zumeist wird die Form der Projektionsfläche als Halbkreis bzw. Kreissektor von nahezu 180 ° beschrieben (Bergmeister et al. 2009, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013, Ahnert 2015). Blair und McPherson (2009) konnten beobachten, dass die meisten Kegel einen Öffnungswinkel zwischen 15 und 90 ° aufweisen. Vielfach wird auch der Radius bzw. die axiale Länge des Kegels beschrieben. Die Längen beobachteter Radien liegen weit auseinander und liegen in einem Rahmen von mehreren 10 m bis mehreren 10 km (Slaymaker 2004, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013). Marchi und Brochot (2000) untersuchten als speziellen Radius die Länge der Winkelhalbierenden des Öffnungswinkels von Kegeln. Schließlich kann anhand der Betrachtung des Grundrisses auch die Bogenlänge des Saumes am Kegelfuß als morphometrisches Merkmal herangezogen werden (Blair und McPherson 2009).

Zentrale Elemente zur Beschreibung der Morphologie von Mur- und Schwemmkegeln stellen auch Längs- bzw. axiale Profile dar, welche aus der Längsansicht mit Betrachtungsrichtung quer zur Fließrichtung abgeleitet werden können, oder für unterschiedliche Winkel in radiale Richtung verlaufende radiale Profile dar. Dabei können mittlere Neigungen entlang des Profils, Neigungen von Kegelsegmenten oder die allgemeine Form des Profils zur Charakterisierung herangezogen werden. Häufig werden Längsprofile auch in Zusammenhang mit dem vorherrschenden Prozessregime betrachtet und interpretiert (Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Marchi und Brochot 2000, Slaymaker 2004, Harvey et al. 2005, Bergmeister et al. 2009, Blair und McPherson 2009, Kaitna 2012, Gutiérrez 2013, Ahnert 2015). Etablierte Indikatoren für das Kegelgefälle sind die mittlere Neigung entlang der Winkelhalbierenden des Öffnungswinkels des Kegels (Marchi und Tecca 1995, Marchi und Brochot 2000) und das mittlere Kegelgefälle in unterschiedlichen Abständen von der Kegelspitze für unterschiedliche radiale Winkel (de Haas et al. 2018). Laut Blair und McPherson (1994) weisen die Radialprofile für unterschiedliche Winkel ähnliche Neigungen auf.

Für Alluvialfächer typische Neigungen liegen im Bereich zwischen 2 und 20° (Blair und McPherson 2009) bzw. im Bereich zwischen 1,5 und 25 ° (meistens jedoch zwischen 2 und 12 °) (Blair und McPherson 1994). Zumal das Kegelgefälle eine Folge der Ablagerungsprozesse darstellt (daher auch als Ablagerungsprofil bzw. Ablagerungsneigung bezeichnet), können für unterschiedliche kegelbildende Prozesse unterschiedliche Kegelneigungen angegeben werden (Blair und McPherson 2009). Durch murartige Prozesse gebildete Kegel sind generell steiler als Kegel, die durch fluviale Prozesse gebildet wurden (Slaymaker 2004, Kaitna 2012). Kaitna (2012) gibt an, dass Murkegel meist eine Neigung von mehr als 4 % (das entspricht ca. 2,3 °) aufweisen, was in etwa mit den Beobachtungen von Marchi et al (1993) für gemischte Kegel (diese sind durch fluviale und murartige Prozesse geprägt) übereinstimmt, welche eine Neigung von 2,1 bis 5,1 ° aufweisen. Im Gegensatz dazu sind rein fluviatil geprägte Kegel flacher (beobachtete Neigungen von 0,7 bis 2,4 °) und rein durch murartige Prozesse geprägte Kegel steiler (beobachtete Neigungen von 5,1 bis 18,4°). Jackson et al. (1987) konnten bei Kegeln, welche von murartigen Prozessen geprägt sind. minimale Neigungen von 4 ° und bei Kegeln, welche von fluvialen Prozessen geprägt sind, maximale Neigungen von 2,5 ° feststellen. Ähnliche Ergebnisse hinsichtlich der von murartigen Prozessen geprägten Kegel liefern Blair und McPherson (2009) mit Neigungen zwischen 4 und 30 ° (häufig zwischen 4 und 18 °), während Kegel, die von fluviatilem Feststofftransport geprägt sind, ein konkaves Profil mit einer Abnahme der Neigung von 5 ° auf 2 bis 3 ° aufweisen. Segmentierte Kegel, die sich aus Abschnitten unterschiedlicher Neigungen zusammensetzen und die zum distalen Ende hin immer flacher werden, können unter anderem durch die zeitliche Abfolge unterschiedlicher Verlagerungs- und Ablagerungsprozesse im Zuge des Kegelaufbaus erklärt werden (Blair und McPherson 2009).

Die Form des Längsprofils von Mur- und Schwemmkegeln kann laut Blair und McPherson (2009) konstant fallend oder konkav ausgeprägt sein (siehe Abbildung 3 [a]). Ahnert (2015) argumentiert, dass die Längsprofile aufgrund der Ablagerung von grobem Material im proximalen und von feinem Material im distalen Bereich sowie des bei abnehmenden Korngrößen verminderten Ablagerungswinkels meist konkav sind. Bergmeister et al. (2009) erwähnen auch konvexe Längsprofile.



Abbildung 3: Radialprofile (a) und Querprofile (b) von Kegeln aus Kalifornien und Nevada (USA), dargestellt mit zehnfacher vertikaler Überhöhung. Pfeile zeigen den Übergang zu angrenzenden Landschaftsformen an. Die Querprofile entstammen dem proximalen (U) und distalen (L) Kegelbereich (Blair und McPherson 2009, S. 417).

Aus der Queransicht, welche sich aus der Betrachtung in Richtung der Fließrichtung ergibt, kann das Querprofil als wichtiger Indikator für die Kegelmorphologie abgeleitet werden. Es ist plano-konvex bis konvex ausgeprägt und weist in Abhängigkeit von der Entfernung zur Kegelspitze unterschiedliche Wölbungen auf (siehe Abbildung 3 [b]; stärkere Wölbungen wurden im oberen Kegelbereich dokumentiert). Zudem können sich je nach Verteilung der Ablagerungslappen Asymmetrien ergeben (Blair und McPherson 1994, Busche et al. 2005, Bergmeister et al. 2009, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013).

Um das auf den Kegeln vorherrschende Prozessregime zu ergründen, wurden häufig auch die Korngrößenverteilung der Ablagerungen sowie die Ablagerungsformen untersucht (Kostaschuk et al. 1986, Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993, Welsh und Davies 2011, de Haas et al. 2014). Jackson et al. (1987) und Marchi et al. (1993) beispielsweise geben an, dass von Murprozessen geprägte Kegel Strukturen wie Leveès und Lappen aufweisen, während diese bei Kegeln, die von fluvialen Prozessen beeinflusst sind, fehlen.

Zur Einschätzung der potenziell auftretenden Verlagerungs- und Sedimentationsprozesse auf Grundlage der Charakteristika des Sammelgebietes können Indikatoren wie die Projektionsfläche des Sammelgebietes, die Länge des Zubringergerinnes bis zur Kegelspitze, der höchste und tiefste Punkt im Sammelgebiet sowie das spezifische Gefälle des Sammelgebietes (ausgedrückt durch die Melton-Zahl) herangezogen werden (Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Marchi und Brochot 2000, Wilford et al. 2004, Blair und McPherson 2009, Welsh und Davies 2011, Heiser et al. 2015). Als Einflussfaktor auf die Sedimentationsbedingungen ist auch die Erhebung der Breite des Haupttales, welche sich von der Kegelspitze bis zur gegenüberliegenden Talflanke erstreckt, von Bedeutung (Marchi und Brochot 2000).

In thematischer Hinsicht können die soeben dargelegten morphometrischen Merkmale den folgenden fünf Kategorien zugeordnet werden:

- Merkmale zur Beschreibung der Ausdehnung der Kegel

- Merkmale zur Beschreibung der Neigung und Schroffheit der Kegel
- Merkmale zur Beschreibung der Heterogenität der Kegeloberfläche
- Merkmale zur Beschreibung der Charakteristika der Sammelgebiete oberhalb der Kegel
- Merkmale zur Beschreibung der Charakteristika der Täler, in welche die Kegelgerinne münden

Im Rahmen dieser Arbeit beschränkten sich die Betrachtungen auf die Analyse eines digitalen Geländemodells, welches im Vergleich zu Geländeerhebungen einen eingeschränkten Informationsgehalt aufweist. Daher konnte im Zuge der Untersuchung nur auf allgemeine morphometrische Merkmale eingegangen werden bzw. mussten bestimmte Merkmale indirekt abgeschätzt werden. So konnte z.B. die Heterogenität der Kegeloberfläche anstatt der üblichen Beschreibung der Geländeformen im Zuge von Feldbegehungen oder der Erhebung der Korngrößenverteilung im Zuge stratigraphischer Untersuchungen nur über indirekte Parameter, die aus dem digitalen Geländemodell abgeleitet werden können, ermittelt werden. Zudem war die Untersuchung spezieller Morphologien, wie z. B. eines eingetieften Gerinnes, der Lage des Verschneidepunktes, sekundärer Veränderungen und dergleichen nicht möglich, zumal die Ausbildung dieser Merkmale nur unter einer natürlichen Entwicklungsdynamik möglich ist. Diese ist aufgrund von technischen Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung zum Schutz vor Naturgefahren (z. B. seitliche Dämme oder Rückhaltebecken), Besiedelung oder sonstiger Bewirtschaftung jedoch nicht auf allen Kegeln gegeben. Andererseits bot sich durch die Auswertung eines digitalen Geländemodells mit einem Geoinformationssystem jedoch auch die Möglichkeit, umfangreichere und komplexere Indikatoren in die Analyse mit einzubeziehen.

Auf Grundlage der Angaben in der Fachliteratur und aufgrund der erläuterten Rahmenbedingungen wurden zur Charakterisierung der Kegelmorphologie und zur Beantwortung der Fragestellungen bezüglich des Prozessregimes im Rahmen dieser Arbeit die in Tabelle 2 angeführten morphometrischen Merkmale ausgewählt.

Morphometrisches Merkmal	Thematische Kategorie	
Projektionsfläche des Kegels bzw. Kegelfläche [ha]	Ausdehnung des Kegels	
Horizontale Länge eines repräsentativen Radialprofils [m]		
Mittlere Neigung des Kegels [°]	Neigung und Schroffheit des Kegels	
Neigung eines repräsentativen Radialprofils [°]		
Melton-Zahl des Kegels [-]		
Standardabweichung der Neigungen am Kegel [°]	Heterogenität der Kegeloberfläche	
Standardabweichung der Krümmungen am Kegel [1/100 m]		
Normalisierte Spannweite der Meereshöhen (Z-Koordinaten) eines repräsentativen Querprofils [-]		
Normalisierte Standardabweichung der Meereshöhen (Z-Koordinaten) eines repräsentativen Querprofils [-]		
Fläche des Einzugsgebietes bzw. Sammelgebietes oberhalb des Kegels [ha]	Charakteristika der Sammelgebiete oberhalb der Kegel	
Melton-Zahl des Einzugsgebietes bzw. Sammelgebietes oberhalb des Kegels [-]		
Breite des Haupttales an der Stelle des Kegels [m]	Charakteristika der Täler, in welche die Kegelgerinne münden	
Besetzungsgrad des Haupttales an der Stelle des Kegels [-]		

Tabelle 2: Übersicht über die ausgewählten morphometrischen Merkmale, gegliedert nach der Zuordnung zu einer der fünf thematischen Kategorien.

Weiters wurden auch Quer- und Radialprofile extrahiert, welche zur Beurteilung der Kegelformen grafisch aufbereitet wurden. Zur Behandlung der Fragestellung, welche den Zusammenhang zwischen dem Ablagerungsbeginn und einer Abnahme des Fließgefälles betrifft, wurde für jeden Kegel ein Längsprofil extrahiert und dargestellt, welches die Beurteilung der Neigung oberhalb und unterhalb der Kegelspitze ermöglichte sowie Rückschlüsse auf eine diskrete Änderung des Gefälles (Knickpunkt) an der Kegelspitze erlaubte.

Während die meisten Parameter aus Rasterdateien mit einer Auflösung von 1 x 1 m abgeleitet werden konnten, basieren die "Mittlere Neigung des Kegels", die "Standardabweichung der Neigungen am Kegel" sowie die "Standardabweichung der Krümmungen am Kegel" auf Rasterdateien mit einer Auflösung von 50 x 50 m. Die Verwendung einer gröberen Auflösung bewirkt eine gewisse Glättung des Geländes, wodurch nur mehr allgemeine Informationen erhalten bleiben und störende Elemente wie z. B. Besiedelung oder Verbauung ausgeblendet werden.

3.3.3 Analysen im Geoinformationssystem

Alle mit der Datenerfassung verbundenen Arbeitsschritte im Rahmen dieser Arbeit erfolgten unter Anwendung des Geoinformationssystems ArcGIS Desktop 10.3.1 und auf Grundlage von Orthofotos sowie eines hoch aufgelösten digitalen Geländemodells (1 x 1 m) und daraus abgeleiteter räumlicher Informationen (Neigungsraster, Höhenlinien und Krümmungsraster). Das Kartenmaterial wurde im Koordinatensystem MGI Austria Lambert (EPSG-Code 31287, winkeltreue Lambert-Kegelprojektion, geografisches Koordinatensystem GCS MGI, Datum D MGI) dargestellt.

Um die Kegel identifizieren und abgrenzen zu können sowie die Erhebung der morphometrischen Merkmale zu ermöglichen, mussten zunächst zusätzliche Informationen aus dem digitalen Geländemodell abgeleitet werden. Daher wurden mit dem Werkzeug "Raster Surface" aus der Gruppe "3D Analyst Tools" der Toolbox aus dem Geländemodell eine Rasterdatei mit den Neigungen des Geländes in Auflösung 1 x 1 m sowie eine Shape-Datei mit den Höhenschichtenlinien in einem Abstand von 5 m generiert. Für die Ableitung der Indikatoren, welche auf Geländeinformationen mit einer geringeren räumlichen Auflösung basieren, musste mit dem Werkzeug "Resample" in den "Data Management Tools" aus dem Geländemodell mit einer Auflösung von 1 x 1 m ein Modell mit einer Auflösung von 50 x 50 m erstellt werden. Anschließend wurde wieder eine Rasterdatei mit den Neigungen in Auflösung 50 x 50 m erstellt.

Nach der Aufbereitung der Datengrundlagen wurden die Kegel nach der im folgenden Abschnitt beschriebenen Vorgangsweise ausgewählt. Diese orientiert sich an den Literaturangaben in Kapitel 3.3.1 sowie der speziellen Aufgabenstellung dieser Arbeit. Murund Schwemmkegel wurden zunächst in der Nähe solcher Stellen vermutet, an denen Wildbäche in einen Vorfluter münden. In diesen Bereichen wurden anschließend nach charakteristischen Kegelformen gesucht, wobei die in der Kartenprojektion hervortretenden Strukturen in der Form eines Kreissegmentes (an einem geschummerten Geländemodell, der Auslenkung von Höhenlinien oder der Form von Bereichen mit einer charakteristischen Neigung erkennbar) als die wichtigsten Anhaltspunkte für das Vorhandensein eines Kegels herangezogen wurden. Zusätzlich konnte die Präsenz eines Kegels mancherorts auch durch eine bogenförmige Auslenkung des Vorfluters infolge von Kegelablagerungen sowie frische Ablagerungen bzw. vegetationsfreie Bereiche (erkennbar auf dem Orthofoto) bestätigt werden. Zur Auswahl möglichst repräsentativer Untersuchungsobjekte, wurden nur solche Kegel ausgewählt, die sich deutlich von benachbarten Geländeformen (mit womöglich verschiedenem Ursprung, wie z. B. Hangschuttablagerungen) abgrenzen ließen. Zudem wurden Kegel, die sehr starke anthropogene Modifizierungen aufweisen (etwa durch Siedlungstätigkeit oder Verbauungen), aus den Erhebungen ausgeschlossen, um die Untersuchungen möglichst an solchen Kegeln durchzuführen, deren Form aus natürlichen Prozessen resultiert. Weiters war es notwendig, die Auswahl auf solche Kegel zu beschränken, denen im Rahmen der Ereignisdokumentation der WLV bereits mindestens ein dokumentierter Verlagerungsprozesses zugeordnet worden war, um einen Zusammenhang zwischen den Morphologien und dem auftretenden Prozessregime herstellen zu können. Schließlich erfolgte auch eine Kategorisierung der ausgewählten Kegel in Hinblick auf die räumliche Beeinflussung durch die Umgebung, um diese im Zuge der Auswertungen berücksichtigen zu können. Es wurden dabei verschmolzene Kegel, die nunmehr einen zusammengewachsenen Kegel bilden, seitlich begrenzte Kegel, die durch benachbarte Landschaftsformen seitlich begrenzt sind (sich jedoch noch eindeutig von diesen abgrenzen lassen) und "normale" Kegel, die weder zusammengewachsen, noch in ihrer Ausdehnung begrenzt sind, unterschieden.

Im Zuge der Identifikation der Kegel wurde zunächst eine Shape-Datei erstellt und zur Verortung jeweils am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß ein Punkt gesetzt. Zusammengewachsene Kegel wurden daher mit mehreren Punkten versehen. In der Attributtabelle der Shape-Datei wurden für jeden gesetzten Punkt folgende Informationen dokumentiert: Identifikationskürzel zur Bezeichnung des Kegelgerinnes, Bezeichnung des Kegelgerinnes, Ereignistyp und Häufigkeit laut Ereignisdokumentation, Angaben zu Besiedelung oder Verbauung durch die WLV und Informationen zur räumlichen Beeinflussung des Kegels durch die Umgebung. Das Identifikationskürzel (ID) sollte den Kegelgerinnen eine kurze und damit praktikable sowie eindeutige Bezeichnung zuweisen. Daher setzt es sich aus den ersten beiden Buchstaben des Untersuchungsgebietes ("pa" bzw. "pi"), je nach Lage orografisch rechts oder links des Vorfluters aus den Buchstaben "r" oder "l" sowie einer fortlaufenden Nummerierung zusammen (also z. B. pal1 oder pir2). Das Identifikationskürzel der Kegel entspricht in der Regel jenem der Kegelgerinne und setzt sich im Falle zusammengewachsener Kegel aus der mit Unterstrich verbundenen ID der einzelnen Kegelgerinne zusammen, welche den Kegel durchgueren (also z. B. pal1 pal2). Im Zuge der Kartierung der morphometrischen Merkmale wurde jedem kartierten Objekt ein solches Identifikationskürzel zugewiesen, um es dem jeweils zugehörigem Kegel bzw. Kegelgerinne zuzuweisen. Die Bezeichnung des Kegelgerinnes wurde im Paltental dem Layer "Gewässernetz" im Digitalen Atlas der Steiermark, im Pitztal dem Laver "Gewässernetz Tirol" im Tiroler Rauminformationssystem "tiris" (dies entspricht dem Gesamtgewässernetz Österreich) entnommen (Land Tirol 2015, Land Steiermark 2018). Eine etwaige Besiedelung bzw. Verbauung der Kegel konnte nach Begutachtung der Orthofotos und Geländemodelle festgestellt werden. Anhand der räumlichen Beeinflussung der Kegel durch die Umgebung wurden zusammengewachsene Kegel, seitlich begrenzte Kegel und "normale" Kegel, die weder zusammengewachsen, noch in ihrer Ausdehnung begrenzt sind, unterschieden. Schließlich wurden der Attributtabelle über das Werkzeug "Add XY Coordinates" in den "Data Management Tools" die X- und Y-Koordinaten der Punkte hinzugefügt.

Die Abgrenzung der Kegel erfolgte mit Hilfe von Polygonen, welche die Kegel umschließen. Dazu wurde eine Shape-Datei (Feature Polygon) mit den Attributen Bezeichnung und Fläche erstellt. Als Bezeichnung wurde jedem Polygon die oben beschriebene ID zugewiesen. Auch die Abgrenzung orientierte sich an den in Kapitel 3.3.1 erläuterten Literaturangaben. Dabei wurden sowohl charakteristische Neigungen als auch Neigungs- und Expositionswechsel an den Rändern der Kegel (erkennbar am Abstand sowie der Krümmung der Höhenlinien) als Anhaltspunkte für die räumliche Ausdehnung der Kegel herangezogen. Um diese charakteristischen Neigungen zu ermitteln, mussten die Neigungen in den abgeleiteten Rasterdateien mit Auflösung 1 x 1 m zunächst sinnvoll kategorisiert werden. Hierbei stellte sich heraus, dass im Paltental typische Kegelstrukturen (Strukturen in Form eines Kegelsegmentes) in einem Neigungsspektrum zwischen 2 ° und 20 ° (meist jedoch zwischen 3 ° und 15 °) gefunden werden können, während sich derartige Strukturen im Pitztal erst in weit steilerem Gelände im Bereich zwischen 5 ° und 35 ° (meist zwischen 8 ° und 30 °) ausbilden. Bei der Abgrenzung wurde darauf geachtet, dass die Grenze am oberen Ende (erkennbar an den Neigungen) dort eine Spitze bildet, wo sich das Gerinne befindet, um von diesem Punkt aus nach oben hin das Sammelgebiet abgrenzen zu können. In das

Sammelgebiet hineinragende Kegelhälse wurden in die Fläche mit einbezogen. Seitlich wurden die Höhenlinien als Indikator für die Ausdehnung herangezogen (diese eignen sich hier aufgrund einer Richtungsänderung und zur Unterscheidung der steileren Taleinhänge). Im unteren Bereich wurden die Neigung und die Lage des Vorfluters als Indikatoren herangezogen. Benachbarte Kegel, welche im Laufe ihrer Entwicklung – ähnlich den sogenannten "bajadas" – miteinander verwachsen sind und sich daher nicht mehr eindeutig voneinander abgrenzen ließen, wurden als ein zusammengewachsener Kegel kartiert. Diese Kegel werden somit von mehreren Gerinnen durchquert und beeinflusst.



Abbildung 4: Übersicht über die Parameter, die im GIS händisch kartiert wurden: Kegelfläche (türkis), Fläche des Sammelgebietes (orange), Radialprofil (blau strichliert), Längsprofil (orange), Querprofile (violett), Breite des Haupttales (grün), vom Kegel besetzte Breite des Haupttales (rot strichliert), höchster Punkt des Längs- und Radialprofils und tiefster Punkt des Radialprofils (rote Kreuze).

Die in Kapitel 3.3.2 beschriebenen morphometrischen Merkmale wurden teilweise direkt als solche aus dem Geoinformationssystem extrahiert, konnten z. T. jedoch nicht direkt dem GIS entnommen werden. Zur Ermittlung der letztgenannten Indikatoren wurden im Geoinformationssystem Hilfsparameter erhoben, aus denen in einem weiteren Schritt (siehe Kapitel 3.3.4) die interessierenden Größen abgeleitet wurden. Es handelt sich dabei um folgende Parameter: Neigung eines repräsentativen Radialprofils, Melton-Zahl des Kegels, normalisierte Spannweite der Z-Koordinaten eines repräsentativen Querprofils, Melton-Zahl des Einzugsgebietes bzw. Sammelgebietes oberhalb des Kegels und Besetzungsgrad des Haupttales an der Stelle des Kegels. Die im Geoinformationssystem erhobenen Parameter sind in Tabelle 3 aufgelistet, wobei eine Einstufung in morphometrische Merkmale und

Hilfsparameter vorgenommen wurde. Zudem sind die Parameter, welche im GIS händisch kartiert wurden, in Abbildung 4 dargestellt.

Tabelle 3: Überblick über die im Geoinformationssystem erhobenen Parameter mit Beschreibungen und Anmerkungen zur Definition, Lage und Ermittlung der Parameter, Angabe der Datengrundlagen, aus welchen die Parameter extrahiert wurden und Verwendung der Parameter als morphometrisches Merkmal oder als Hilfsparameter, aus welchem morphometrische Merkmale abzuleiten sind.

Parameter	Beschreibung und Anmerkungen	Datengrundlage	Verwendung
Kegelfläche	Projektionsfläche des Kegels	DGM 1 x 1 m	Morphometrisches Merkmal
Fläche des Einzugsgebietes bzw. Sammelgebietes	Projektionsfläche des Sammelgebietes	DGM 1 x 1 m	Morphometrisches Merkmal
Repräsentatives Radialprofil	Verlauf zwischen Kegelspitze und Kegelfuß etwa entlang der Winkelhalbierenden des Öffnungswinkels des Kegels	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Länge eines repräsentativen Radialprofils	Verlauf zwischen Kegelspitze und Kegelfuß etwa entlang der Winkelhalbierenden des Öffnungswinkels des Kegels	DGM 1 x 1 m	Morphometrisches Merkmal / Hilfsparameter
Längsprofil	Oberhalb der Kegelspitze Verlauf entlang des Gerinnes über eine Länge, die jener des Radialprofils entspricht, unterhalb der Kegelspitze Verlauf entlang des Radialprofils	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Länge des Längsprofils	Oberhalb der Kegelspitze Verlauf entlang des Gerinnes über eine Länge, die jener des Radialprofils entspricht, unterhalb der Kegelspitze Verlauf entlang des Radialprofils	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Querprofil	Lage in 25%, 50% und 75 % der Länge des Radialprofiles ab Öffnung des Kegels (d. h. ohne Kegelhals)	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Länge eines Querprofils	Lage in 25%, 50% und 75 % der Länge des Radialprofiles ab Öffnung des Kegels	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Breite des Haupttales	Bereich zwischen den steileren Talflanken; Verlauf ca. in Richtung der Winkelhalbierenden des Kegels	DGM 1 x 1 m	Morphometrisches Merkmal
Abschnitt der Breite des Haupttales, der vom Kegel besetzt ist	Verlauf entlang der kartierten Breite des Haupttales	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Meereshöhe des höchsten Punktes des Kegels bzw. Radialprofils	Lage an der Kegelspitze am oberen Ende des Radialprofils	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Meereshöhe des tiefsten Punktes des Radialprofils	Lage am unteren Ende des Radialprofils	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Meereshöhe des tiefsten Punktes des Kegels	Automatisierte Ermittlung	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Meereshöhe des höchsten Punktes des Längsprofils	Lage am oberen Ende des Längsprofils	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Meereshöhe des höchsten Punktes im Sammelgebiet	Automatisierte Ermittlung	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter

Höchster Punkt eines repräsentativen Querprofils	In 50% der Länge des Radialprofiles ab Öffnung des Kegels; automatisierte Ermittlung	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Tiefster Punkt eines repräsentativen Querprofils	In 50% der Länge des Radialprofiles ab Öffnung des Kegels; automatisierte Ermittlung	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Standardabweichung der Meereshöhen (Z- Koordinaten) entlang eines repräsentativen Querprofiles	In 50% der Länge des Radialprofiles ab Öffnung des Kegels; automatisierte Ermittlung	DGM 1 x 1 m	Hilfsparameter
Mittlere Neigung auf der Kegelfläche	Automatisierte Ermittlung	Neigungsraster 50 x 50 m	Morphometrisches Merkmal
Standardabweichung der Neigung auf der Kegelfläche	Automatisierte Ermittlung	Neigungsraster 50 x 50 m	Morphometrisches Merkmal
Standardabweichung der Krümmung auf der Kegelfläche	Automatisierte Ermittlung	Krümmungsraster 50 x 50 m	Morphometrisches Merkmal

Die Kartierung der Kegelfläche wurde bereits im Zuge der Beschreibung der Abgrenzung der Kegel erläutert.

Die Kartierung der Sammelgebiete erfolgte auf Grundlage der bereits bestehenden Kartierung der Einzugsgebiete der WLV, welche als Shape-Datei vorlag. Hierbei wurden die interessierenden Polygone der Shape-Datei in der Attributtabelle ausgewählt und anschließend als eigenständige Shape-Datei abgespeichert. Anschließend wurden die Polygone dieser erstellten Shape-Datei verzerrt und angepasst, sodass sich der tiefste Punkt im Sammelgebiet mit der Kegelspitze deckt und die Grenzen von dort aus in etwa rechtwinkelig zu den Höhenlinien (dies entspricht der Fließrichtung des Wassers) verlaufen (diese Korrektur war meist nur im unteren Bereich des Sammelgebietes notwendig, zumal der tiefste Punkt mit der Kegelspitze neu definiert worden war). Aufgrund von Ungenauigkeiten wurden mitunter auch neue Polygone erstellt bzw. bestehende Polygone geteilt. In der Attributtabelle wurde ein Feld für die Bezeichnung sowie für die Fläche eingerichtet und die Bezeichnung laut den darunterliegenden Kegeln vorgenommen.

Für das repräsentative Radialprofil wurde ein Verlauf von der Kegelspitze zum Kegelfuß in etwa der Fließrichtung des Wassers und ca. mittig auf dem Kegel (in etwa der Hälfte des Öffnungswinkels des Kegels) gewählt. Zur Kartierung (das Profil wurde als Linie kartiert) wurde eine Shape-Datei (Feature Linie) mit den Attributen Bezeichnung und Länge erstellt. Aus Gründen der Durchführbarkeit wurde bei der Kartierung wie folgt vereinfacht vorgegangen: Start der Linie an der Kegelspitze, oben im Bereich des Kegelhalses (falls vorhanden) Verlauf in etwa in der Mitte des Kegels (die Länge des Profils wird durch geringe Variationen im Verlauf der Linien nicht wesentlich verändert), ab der Öffnung des Kegels (Kegel wird breiter, Gerinne tritt aus dem Sammelgebiet aus) Verlauf entlang der Fließrichtung des Wassers (rechtwinkelig zu den Höhenlinien). Bei zusammengewachsenen Kegeln wurden mehrere Profile erstellt, zumal diese die allgemeine Form besser als nur ein Profil beschreiben konnten. Die Bezeichnung erfolgte dabei nach der ID des näher gelegenen Punktes laut der zu Beginn erstellten Shape-Datei zur Identifikation der Kegel.

Zur Kartierung der Längsprofile wurde zunächst eine Shape-Datei (Feature Linie) mit den Attributen Bezeichnung und Länge erstellt. Das Profil wurde oberhalb der Kegelspitze über eine Länge, die in etwa jener des Radialprofils unterhalb der Kegelspitze entspricht, entlang des Gerinnes kartiert und unterhalb der Kegelspitze entlang des Radialprofils. Dies wurde mit der Funktion "Trace" in der Editor-Symbolleiste bewerkstelligt. Die Benennung der Profile erfolgte entsprechend der ID in der Shape-Datei zur Identifikation der Kegel. Falls bei zusammengewachsenen Kegeln die Fortführung des Längsprofils entlang des Radialprofiles

nicht möglich war, wurde das Längsprofil im Kegelbereich mitunter auch entlang des Gerinnes kartiert.

Die Querprofile wurden in 25 %, 50 % und 75 % der Länge des Radialprofiles ab Öffnung des Kegels (d. h. Radialprofil ohne Kegelhals) positioniert. Zur Lokalisierung dieser Positionen musste eine Shape-Datei (Feature Linie) erstellt und das Radialprofil ab der Öffnung des Kegels mittels des Werkzeuges "Trace" in der erstellten Datei rekonstruiert werden. Die Öffnung beginnt dort, wo sich das untere Ende des schmäleren Kegelhalses befindet (falls es keinen Hals gibt an der Kegelspitze) und sich der Kegel im Haupttal, mehr oder weniger ohne seitliche Begrenzung des Seitentales, aus welchem der Wildbach fließt, ausbreitet. In einem zweiten Schritt wurde zur Aufteilung der Linie eine weitere Shape-Datei (Feature Punkte) erstellt. Die vorher konstruierten Hilfslinien ab Öffnung des Kegels wurden schließlich mit Hilfe des Werkzeuges "Construct Points" des Editors in vier gleich lange Teile geteilt, wodurch auf 25%, 50% und 75% der Länge der konstruierten Linie Punkte erstellt wurden. Im letzten Schritt wurde erneut eine Shape-Datei (Feature Linie) für die interessierenden Querprofile mit den Attributen Bezeichnung und Länge erstellt. In dieser Shape-Datei wurden schließlich drei Querprofile je Kegelfläche erstellt und benannt (wiederum nach der ID des Kegels, jedoch mit dem Zusatz "1" für das oberste, "2" für das mittlere und "3" für das unterste Profil, z. B. "pal2 1"). Dabei wurden Vertikalschnitte erzeugt, welche in etwa die generierten Hilfspunkte schneiden und am Rande der Kegelfläche sowohl auf der linken als auch auf der rechten Seite dieselbe Meereshöhe aufweisen.

Zur Kartierung der Breite des Haupttales wurde eine Shape-Datei (Feature Linie) mit den Attributen Bezeichnung und Länge erstellt. Daraufhin wurde die Breite des Haupttales abgeschätzt und in Richtung der Hauptausbreitungsrichtung des Kegels (ca. Winkelhalbierende des Öffnungswinkels des Kegels) kartiert. Die Abschätzung orientierte sich am Beginn der steileren Talflanken (erkennbar an den sich schlagartig verringernden Abständen zwischen den Höhenlinien) in jenen Abschnitten des Haupttales, welche nicht von Kegeln besetzt sind. Die Benennung erfolgte entsprechend der ID in der Shape-Datei zur Identifikation der Kegel.

Zur Erfassung des Abschnitts der Breite des Haupttales, der vom Kegel besetzt ist, wurde wiederum eine Shape-Datei (Linie) mit den Attributen Bezeichnung und Länge erstellt, worauf entlang der Linie, welche die Breite des Haupttales beschreibt, die von der Projektionsfläche des Kegels besetzte Länge kartiert wurde. Die Benennung erfolgte entsprechend der ID in der Shape-Datei zur Identifikation der Kegel.

Nach der Kartierung der linien- und flächenhaften Parameter in den entsprechenden Shape-Dateien konnten in der Attributtabelle die Geometrien (horizontale Längen und Projektionsflächen) der einzelnen Features (Linien und Flächen) über den Befehl "Calculate Geometry" im Kontextmenü berechnet werden. Dabei wurde die im Zuge der Erstellung der Shape-Dateien eingerichtete Spalte für das Attribut Geometrie mit den zugehörigen Werten aufgefüllt.

Zumal für die in den Shape-Dateien kartierten Linien zur Beschreibung des Verlaufes der Radial-, Längs- und Querprofile nach dem Hinzufügen der Geometrien lediglich horizontale Längen, jedoch keinerlei Höheninformation (Z-Koordinaten) bekannt sind, mussten die Profile in einem gesonderten Arbeitsschritt generiert werden. Dies erfolgte mittels des Werkzeuges "Stack Profile" der "3D Analyst Tools". Dabei wurde allen in einer Shape-Datei enthaltenen Profilverläufen die Höheninformation aus dem Geländemodell mit Auflösung 1 x 1 m zugewiesen und als Tabelle ausgegeben, welche für die weiteren Bearbeitungsschritte in Excel exportiert werden musste (siehe dazu die Beschreibungen weiter unten). In der Tabelle sind für jedes Profil Wertepaare zur Beschreibung des Profilsverlaufes enthalten. Für jeden Punkt wird dabei die Horizontaldistanz zum Startpunkt des Profils und die an dieser Stelle vorherrschenden Geländehöhe angegeben.

Zur Extraktion der Meereshöhe am höchsten (Kegelspitze) und tiefsten Punkt des Radialprofils sowie am höchsten Punkt des Längsprofils wurde eine Shape-Datei (Feature Punkt) erstellt,

welcher das Attribut Bezeichnung hinzugefügt wurde. Anschließend wurde bei jedem interessierenden Objekt (Spitze der Kegelfläche, oberes Ende des Längsprofils, unteres Ende des Radialprofils) ein Punkt gesetzt und entsprechend der Profile benannt, wobei bei der Spitze der Kegelfläche der Zusatz "o", beim oberen Ende des Längsprofils der Zusatz "oo" und beim untere Ende des Radialprofils der Zusatz "u" hinzugefügt wurde. Schließlich wurde den Punkten mit Hilfe des Werkzeuges "Add Surface Information" der "3D Analyst Tools" die Höheninformation (Z-Koordinaten) aus dem Geländemodell mit Auflösung 1 x 1 m hinzugefügt. Die maximale Meereshöhe im Sammelgebiet, die minimale Meereshöhe auf dem Kegel, die maximale und minimale Meereshöhe sowie die Standardabweichung der Meereshöhen (Z-Koordinaten) auf dem repräsentativen Querprofil, die mittlere Neigung auf dem Kegel, die Standardabweichung der Neigung auf dem Kegel sowie die Standardabweichung der Krümmung auf dem Kegel konnten mit Hilfe des Werkzeuges "Zonal Statistics as Table" der "Spatial Analyst Tools" aus den entsprechenden Rasterdateien extrahiert werden. Die Ermittlung des Mittelwertes der Neigung sowie der Standardabweichung der Neigung und der Krümmung der Kegel erfolgte auf Grundlage des aus dem digitalen Geländemodell abgeleiteten Neigungs- und Krümmungsrasters mit einer Auflösung von 50 x 50 m, während die restlichen Größen aus dem digitalen Geländemodell mit einer Auflösung von 1 x 1 m ermittelt wurden. Im Zuge der Extraktion wurde für die einzelnen Features (Zonen, d. h. Linien oder Flächen) der Shape-Dateien jeweils die interessierenden Größen (Minimale bzw. maximale Z-Koordinaten, Standardabweichung der Z-Koordinaten, Mittelwert der Neigung, Standardabweichung der Neigung und der Krümmung) in Form einer Tabelle ausgegeben. Diese wurde anschließend in Excel exportiert (siehe dazu die Beschreibungen weiter unten). Als repräsentatives Querprofil wurde das Querprofil auf 50 % der Länge des Radialprofils ab Öffnung des Kegels unterhalb des Kegelhalses gewählt.

Als letzter Arbeitsschritt erfolgte nach der Kartierung und Extraktion der interessierenden morphometrischen Merkmale und Hilfsparameter sowie der Zuweisung der entsprechenden räumlichen Information die Abspeicherung der erstellten Tabellen und Attributtabellen in Form von Excel-Dateien. Dies wurde mit Hilfe des Werkzeuges "Table to Excel" der "Conversion Tools" der Toolbox bewerkstelligt. Diese Dateien bildeten die Grundlage für die weitere Bearbeitung der Daten (Ableitung von morphometrischen Merkmalen aus den Hilfsparametern für die Darstellungen und statistischen Auswertungen sowie Normalisierung und grafische Darstellung der Profile).

3.3.4 Aufbereitung der Daten

Die Aufbereitung der mit Hilfe des Geoinformationssystems aus den Rasterdateien extrahierten Informationen (Hilfsparameter und morphometrische Merkmale) erfolgte mit Microsoft Excel 2016.

Zur Ermittlung der interessierenden Größen mussten einige morphometrischen Indikatoren aus den im GIS ermittelten Größen (Hilfsparameter in Tabelle 3) abgeleitet werden. Dabei wurden die Kegelflächen sowie die Flächen der Einzugsgebiete von Quadratmeter auf Hektar umgerechnet, die Melton-Zahlen der Kegel sowie der Einzugsgebiete (Sammelgebiete) auf Basis der maximalen und minimalen Höhe auf der Fläche sowie des Flächenausmaßes ermittelt und der Besetzungsgrad des Haupttales ermittelt, indem die vom Kegel besetzte Breite des Tales auf die Breite des Haupttales bezogen wurde.

Zudem erfolgte durch die Referenzierung der Differenzen zwischen der maximalen und der minimalen Z-Koordinate der repräsentativen Querprofile (auf 50 % der Länge des Radialprofiles gelegen) auf die entsprechende Profillänge die Berechnung der normalisierten Spannweite der Z-Koordinaten des Querprofils. Analog dazu erfolgte durch die Referenzierung der Standardabweichung der Z-Koordinaten entlang der repräsentativen Querprofile auf die entsprechende Profillänge die Berechnung der Z-Koordinaten der Z-Koordinaten entlang der repräsentativen Querprofile auf die entsprechende Profillänge die Berechnung der normalisierten Standardabweichung der Z-Koordinaten der Mittleren Querprofile.

Weiters wurden die Neigungen der Radialprofile als Quotient zwischen den Höhendifferenzen zwischen Startpunkt (an der Kegelspitze) und Endpunkt (am Kegelfuß) des Profils und der horizontalen Länge des Profils berechnet und ins Gradmaß umgewandelt. Die Berechnung der Neigungen der Längsprofile ober- und unterhalb der Kegelspitze erfolgte auf die gleiche Weise, wobei als Berechnungsgrundlage einerseits die Höhendifferenz zwischen dem oberen Ende des Längsprofils und der Kegelspitze sowie die horizontale Länge des Längsprofils oberhalb der Kegelspitze und andererseits die Höhendifferenz zwischen der Kegelspitze und dem unteren Ende des Längsprofils sowie die horizontale Länge des Profils unterhalb der Kegelspitze dienten. Die horizontale Länge des Längsprofils oberhalb der Kegelspitze wurde durch die Subtraktion der horizontalen Länge des Radialprofils von der horizontalen Länge des Längsprofils ermittelt.

In einem weiteren Schritt wurde jedem Kegel nach den laut Ereignisdokumentation der WLV im Einzugsgebiet oder auf dem Kegel mehrheitlich (am häufigsten) auftretenden Prozessen eine Prozessgruppe (Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport bzw. "H-FF" sowie murartiger Feststofftransport und Murgang bzw. "MF-M") zugewiesen (nur in seltenen Fällen konnte aufgrund verschiedener Prozesse keine eindeutige Zuweisung vorgenommen werden, was mit der Anmerkung "verschiedene Prozesse" vermerkt wurde) sowie eine Klassifikation der Kegel nach Ausprägung der Melton-Zahl im Einzugsgebiet (größer 0,69 oder kleiner 0,69) vorgenommen, wobei die Grenzwerte der Klassifikation auf dem Entscheidungsmodell von Heiser et al. (2015) zur Unterscheidung zwischen fluviatilem Feststofftransport und Hochwasser einerseits und Murgängen andererseits beruhen, welches auf Grundlage österreichischer Daten entwickelt wurde. Hierbei resultierten in seltenen Fällen bei Kegeln mit mehreren darüber liegenden Sammelgebieten verschiedene Melton-Zahlen der Einzugsgebiete, die jedoch demselben Kegel zugeordnet sind. In diesem Fall wurde ein Kegel nur klassifiziert, wenn alle zugeordneten Melton-Zahlen ober- oder unterhalb der Schwelle von 0,69 waren und zudem keine Melton-Zahlen als abhängige Variablen angegeben.

Bei zusammengewachsenen Kegeln wurde aufgrund des häufigen Vorliegens mehrerer Radialprofile je Kegel für den Indikator "Horizontale Länge des Radialprofils" das längste Profil herangezogen und für die "Neigung des Radialprofils" eine mit den Längen der Profile gewichtete Mittelung der Neigungen der Profile vorgenommen.

Im Zuge der Aufbereitung der Daten für die statistischen Auswertungen wurde in Excel schließlich eine Datenstruktur angelegt, welche für jeden Kegel die Zuordnung zu einer Prozessgruppe, einer Klasse laut Melton-Zahl der Einzugsgebiete, einem Untersuchungsgebiet (unabhängige Variablen) sowie zu den aus dem GIS extrahierten und den daraus abgeleiteten morphometrischen Merkmalen (abhängige Variablen) erlaubte. Um das Einlesen in die Statistik-Software zu ermöglichen, wurden diese Daten im CSV-Format abgespeichert.

Um einen grafischen Vergleich der Formen der unterschiedlich langen Radial-, Längs- und Querprofile zu ermöglichen, mussten diese auf einer einheitlichen Art und Weise dargestellt werden. Zu diesem Zweck erfolgte eine Normalisierung der Profile, indem die Wertepaare zur Beschreibung des Profilsverlaufes (Horizontaldistanz zum Startpunkt des Profils und Geländehöhe) durch die Länge der entsprechenden Profile dividiert wurden, womit die Distanzen entlang des Profils einem Wertebereich zwischen null und eins zugeordnet wurden. Auch die Lage der Kegelspitze (definiert durch die Distanz zum Ende des Radialprofils am Kegelfuß und somit durch die Länge des Radialprofils und die Meereshöhe am oberen Ende des Radialprofils) musste auf diese Weise normalisiert werden. Die normalisierten Wertepaare zur Beschreibung der Profile wurden zur Eingabe in das Programm AutoCAD schließlich tabellarisch organisiert, sodass in jeder Zeile die Koordinaten eines Profilpunktes in der Form "normalisierte Distanz, normalisierte Meereshöhe" enthalten waren. Bezüglich der Lage der Kegelspitze wurde auf dieselbe Weise vorgegangen.
3.3.5 Erstellung der Längs-, Radial- und Querprofile

Die Visualisierung der Radial-, Längs- und Querprofile erfolgte unter Anwendung der Software AutoCAD. Dabei wurde auf den Befehl "PLINIE" zurückgegriffen, welcher das Zeichnen von 2D-Polylinien ermöglicht. Dieses Werkzeug ermöglichte es, die zuvor in der Form "normalisierte Distanz,normalisierte Meereshöhe" aufbereiteten Koordinaten der Profile in die Befehlszeile einzufügen, worauf die Profillinie erstellt wurde, welche diese Punkte verbindet. Auf dieselbe Weise wurden mittels des Befehls "PUNKT" bei den Längsprofilen zur Kennzeichnung der Lage der Kegelspitze die aufbereiteten Koordinaten der Kegelspitze eingefügt, worauf an dieser Stelle ein Punkt erstellt wurde. Die Profile wurden anschließend mit dem zugehörigen Identifikationskürzel benannt und entsprechend der Zuordnung zu einer Prozessgruppe (Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, murartiger Feststofftransport und Murgang sowie verschiedene Prozesse) angeordnet. Die drei Querprofile wurden für jeden Kegel übereinander dargestellt und entsprechend ihrer Lage in 25 %, 50 % und 75 % der Länge des Radialprofiles ab Öffnung des Kegels mit den Ziffern "1", "2" und "3" versehen.

3.3.6 Veranschaulichung der Daten

Um einen Überblick über die Beschaffenheit der Daten zu gewinnen sowie diese darzustellen, wurde mit Hilfe der Statistik-Software R 3.4.2 eine grafische Aufbereitung der morphometrischen Indikatoren vorgenommen. Dabei wurden als Darstellungsmethoden sogenannte Box- und Whiskers-Diagramme sowie Streudiagramme gewählt. Aufgrund der sehr geringen Anzahl der Beobachtungsobjekte wurden jene Kegel, die von verschiedenen Prozessen beeinflusst sind, nicht visualisiert.

Boxplots geben über die Visualisierung von Median, Quartilen und Extremwerten von Verteilungen Auskunft über die Streuung, das Spektrum und potenzielle Ausreißer der Daten. Mit dieser Darstellungsmethode wurde die Ausprägung der wichtigsten Indikatoren in Hinblick auf das Prozessregime basierend auf den Daten beider Untersuchungsgebiete sowie den im Paltental erhobenen Daten visualisiert. In der Statistik-Software R werden neben Median, 1. Quartil (25. Perzentile) und 3. Quartil (75. Perzentile) auch die sogenannten Whiskers dargestellt, wobei diese nach einer speziellen Definition ermittelt werden. Als oberer Whisker wird je nach Ausprägung entweder der maximale Wert der Daten oder die Summe aus dem 3. Quartil und dem eineinhalbfachen Interquartilbereich zwischen 1. und 3. Quartil festgelegt (es wird der kleinere der beiden Werte ausgewählt) und als unterer Whisker entweder der minimale Wert oder die Differenz aus 1. Quartil und dem eineinhalbfachen Interquartilbereich (swird der größere der beiden Werte ausgewählt) (Shi 2010). Ausreißer, die außerhalb dieses Bereiches liegen, werden als Punkte dargestellt.

In einem Streudiagramm (auch Punktewolke oder scatter plot genannt) werden Datenpunkte (beobachtete Objekte) in Abhängigkeit der Ausprägung zweier Merkmale in einem Koordinatensystem dargestellt. Damit erlauben Streudiagramme die gleichzeitige Darstellung zweier Variablen. Auf diese Weise wurden die Kegel in Abhängigkeit folgender Merkmalskombinationen dargestellt: Mittlere Neigung der Kegel und Melton-Zahl der Einzugsgebiete, Fläche der Kegel und Fläche der Einzugsgebiete, mittlere Neigung der Kegel und Fläche der Einzugsgebiete. Dabei wurden die Kegel in Hinblick auf das vorherrschende Prozessregime unterschiedlich dargestellt, um einen Vergleich zwischen den beiden Prozessgruppen zu ermöglichen. Schließlich wurden auch Streudiagramme mit integrierten Vergleichswerten aus der Literatur zur Differenzierung von Kegeln in Hinblick auf das Prozessregime sowie den im untersuchten Datenmaterial vorgefundenen Grenzwerten zwischen den Prozessen erstellt.

3.4 Statistische Auswertungen

Zur Beantwortung der Fragestellungen, welche die Unterscheidung der morphometrischen Indikatoren zwischen unterschiedlichen Gruppierungsvariablen (Prozessregime, Untersuchungsgebiet und Melton-Zahl des Einzugsgebietes) sowie den Beginn der Ablagerungen infolge einer Gefällsminderung betreffen, wurden die aufbereiteten Daten unter Anwendung der Statistik-Software R 3.4.2 einer statistischen Analyse unterzogen.

Beim statistischen Vergleich der Prozessgruppen (Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport sowie murartiger Feststofftransport und Murgang) wurden alle morphometrischen Merkmale in die Analyse mit einbezogen, welche die Morphologie der Kegel und der Einzugsgebiete beschreiben. Beim statistischen Vergleich nach Untersuchungsgebiet und Melton-Zahl des Einzugsgebietes wurden nur jene Parameter betrachtet, welche die Morphologie der Kegel beschreiben. Die Breite des Haupttales sowie der Besetzungsgrad des Haupttales wurden bei den Vergleichen nicht berücksichtigt, zumal sie lediglich Zusatzinformationen für die Interpretation darstellen.

Die Vergleiche der Kegelflächen sowie der Melton-Zahlen der Kegel erfolgte unter Ausschluss seitlich begrenzter Kegel, während beim Vergleich der Indikatoren, welche die Querprofile beschreiben, durch Schutzmaßnahmen der WLV stark verbaute Kegel nicht berücksichtigt wurden. Zudem wurden beim Vergleich nach Prozessgruppe aufgrund der sehr geringen Anzahl der Kegel, die von verschiedenen Prozessen beeinflusst sind, nur solche Kegel berücksichtigt, welche nach mehrheitlichem Auftreten der Prozesse eine eindeutige Zuordnung zu einer Gruppe erlaubten sowie beim Vergleich nach Melton-Zahlen der Einzugsgebiete nur solche Kegel verglichen, die eindeutig einer der beiden Gruppen zuzuordnen waren.

Die Statistischen Vergleiche der morphometrischen Merkmale der Kegel und Einzugsgebiete folgenden drei Gruppierungsvariablen: erfolgten für die Prozessregime laut Ereignisdokumentation (Vergleich zwischen den Gruppen "Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport" sowie "Murartiger Feststofftransport und Murgang"), Melton-Zahl der Einzugsgebiete (Vergleich zwischen den Gruppen "<0,69" und ">0,69") und Untersuchungsgebiet (Vergleich zwischen den Gruppen "Paltental" und "Pitztal"). Hierbei handelt es sich um Vergleiche intervallskalierter Größen (abhängige Variablen) jeweils zwischen zwei unabhängigen Stichproben bzw. Gruppen (unabhängige Variablen).

Zur statistischen Prüfung der Nullhypothese, dass sich die Mittelwerte der beiden Gruppen unter Annahme einer gewissen Irrtumswahrscheinlichkeit nicht unterscheiden, kann der parametrische t-Test für unabhängige Stichproben angewendet werden. Aufgrund der geringen Stichprobengrößen musste für die Anwendung dieses Tests das Kriterium der Normalverteilung der Daten vorausgesetzt werden. Zudem sind besonders bei Vorliegen ungleicher Stichprobenumfänge heterogene Varianzen der Stichproben nicht zulässig. Daher erfolgte mittels des Anderson-Darling-Tests eine Prüfung der Verteilung der Daten innerhalb der Gruppen auf Normalverteilung sowie mittels des Levene-Tests eine Prüfung auf Varianzhomogenität zwischen den Gruppen. Bei Vorliegen von nicht normalverteilten Grundgesamtheiten der Stichproben und bzw. oder ungleichen Varianzen der Gruppen wurde alternativ der nicht parametrische Mann-Whitney-U-Test, der zentrale Tendenzen mittels einer Rangstatistik vergleicht, angewendet. Dieser Test setzt zumindest ordinalskalierte Daten und zwei unabhängige Stichproben voraus (Riepl 2012, Rasch et al. 2014, Schwarz et al. 2018a, Schwarz et al. 2018b).

Der statistische Vergleich bezüglich der Neigungen oberhalb und unterhalb der Kegelspitze wurde sowohl für alle Beobachtungen als auch nach Prozessregime getrennt durchgeführt. Beim statistischen Vergleich der Neigungen oberhalb und unterhalb der Kegelspitze handelt es sich nicht mehr um unabhängige Stichproben, zumal die zu vergleichenden Neigungen jeweils unterschiedliche Abschnitte im selben Längsprofil betreffen. Um die Streuung zwischen den Längsprofilen auszuschalten und somit zu vermeiden, dass falsche Effekte abgebildet werden, wurde daher nicht die Neigung an sich, sondern die Differenzen zwischen der

Neigung oberhalb und der Neigung unterhalb der Kegelspitze zum Vergleich herangezogen (Sterba 2004). Beim Vorliegen intervallskalierter und normalverteilter Daten (beim Vorliegen von Stichprobenumfängen von n > 30 kann das Kriterium der Normalverteilung auch verletzt werden) sowie unabhängiger Vergleichsgruppen wurde der t-Test für abhängige (bzw. gepaarte) Stichproben implementiert, womit die Nullhypothese überprüft werden konnte, dass sich der Mittelwert der Differenzen nicht von null unterscheidet. Zur Prüfung der Voraussetzung der Normalverteilung der Differenzen wurde der Anderson-Darling-Test herangezogen. Bei Verletzung der Voraussetzung der Normalberteilung wurde bei Stichproben mit n < 30 alternativ der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test angewendet, welcher auf Basis von Rängen, welche den Differenzen zugeordnet werden, überprüft, ob sich die zentralen Tendenzen der beiden Gruppen unterscheiden (Schwarz et al. 2018c).

4 Ergebnisse

4.1 Übersicht über die erhobenen Mur- und Schwemmkegel

4.1.1 Paltental

Tabelle 4 liefert einen Überblick über die im Paltental kartierten Mur- und Schwemmkegel. Darin erfolgt eine Auflistung der Kegel sowie der Kegelgerinne, welche am Aufbau der Kegel beteiligt sind und durch einen Punkt am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß verortet sind. Diese Punkte sind in Abbildung 5 dargestellt, wobei die Punkte in Abhängigkeit von der räumlichen Beeinflussung des vom Gerinne durchquerten Kegels durch die Umgebung kategorisiert sind (seitliche Begrenzung des Kegels, Verschmelzung mit benachbarten Kegeln bzw. keine Beeinflussung durch die Umgebung). Neben den Koordinaten der gesetzten Punkte liefert Tabelle 4 zur besseren Handhabung auch eine Zuweisung der Kegel und Kegelgerinne zu einem Identifikationskürzel (ID Kegel und ID Kegelgerinne) sowie Informationen zur Zuweisung der Kegel zu einer Prozessgruppe (murartiger Feststofftransport und Murgang bzw. MF-M sowie Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport bzw. H-FF), zur Bezeichnung des Gerinnes, zu den laut Ereignisdokumentation aufgetretenen Prozessen im Gerinne oder auf dem Kegel, zur anthropogenen Be- bzw. Verbauung (Besiedelung oder Verbauung zum Schutz vor Naturgefahren) und zur räumlichen Beeinflussung der Kegel durch die Umgebung. Die Kartierung der Kegel sowie der morphometrischen Indikatoren bzw. Hilfsparameter im Paltental ist in Anhang A ersichtlich. Die Ausprägung der morphometrischen Merkmale der einzelnen Kegel im Paltental ist in Anhang C angeführt.

Im Paltental konnten 23 Kegel kartiert werden, welche durch Ablagerungsprozesse aus 27 Fließgewässern beeinflusst werden. Diese Divergenz zwischen der Anzahl der Kegelgerinne und der Anzahl der Kegel resultiert aus der Verschmelzung benachbarter Kegel, die nunmehr einen Kegel bilden und somit von mehreren Gerinnen beeinflusst werden. Im Speziellen handelt es sich dabei um die Kegelgerinne mit dem Identifikationskürzel pal7, pal8 und pal13. die Kegelgerinne mit dem Identifikationskürzel par1 und par2 sowie die Kegelgerinne mit dem Identifikationskürzel par7 und par8, welche jeweils einen zusammengewachsenen Kegel (pal7 pal8 pal13, par1 par2 und par7 par8) ausbilden (siehe dazu auch die Kartierung der Kegel in Anhang A). Zudem weisen auch einige Kegel, die nicht zusammengewachsen sind (wie etwa Kegel pal6), mehrere Sammelgebiete auf, die in den Kegel münden (siehe Kartierung der Kegel in Anhang A). Von den Kegeln, die von mehreren Sammelgebieten beeinflusst werden, weist nur ein Kegel (par7 par8) Sammelgebiete mit Melton-Zahlen sowohl größer als auch kleiner 0,69 auf (siehe Tabelle in Anhang C). Drei Kegel weisen eine seitliche Begrenzung durch benachbarte Landschaftsformen auf, wodurch sie nicht für eine Untersuchung der Ausdehnung der Kegel herangezogen werden konnten. Die Kegel sind zwar zum Teil ver- bzw. bebaut, jedoch mit einer akzeptablen Eingriffsstärke, sodass alle Kegel für eine Analyse der Heterogenität der Kegeloberfläche herangezogen werden konnten. Von den 23 Kegeln sind (aufgrund der mehrheitlich dokumentierten Prozesse) drei von murartigem Feststofftransport und Murgang (Prozessgruppe MF-M) und 20 von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport (Prozessgruppe H-FF) beeinflusst.

Tabelle 4: Auflistung der Kegel und der zugewiesenen Prozessgruppen (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport. MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang) sowie der zur Verortung der Kegelgerinne am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß gesetzten Punkte im Paltental mit Informationen zur Bezeichnung des Kegelgerinnes, den laut Ereignisdokumentation der WLV in Vergangenheit aufgetretenen Verlagerungsprozessen im Gerinne (H = Hochwasser, FF = fluviatiler Feststofftransport, MF = murartiger Feststofftransport, M = Murgang), der Verbauung der Kegelfläche, Informationen zur räumlichen Beeinflussung des vom Gerinne durchquerten Kegels durch die Umgebung (Seitlich begr. = seitliche Begrenzung des Kegels, Zusammengew. = Verschmelzung mit benachbarten Kegeln, Normal = keine Beeinflussung) sowie den gesetzten Koordinaten der Punkte in der Projektion MGI Austria Lambert.

ID Kegel	Zuordnung Prozess- gruppe	ID Kegelgerinne	Bezeichnung Wildbach	Prozesse Ereignisdok.	Verbauung	Räumliche Beeinflussung	X-Koordinate	Y-Koordinate
pal2	MF-M	pal2	Tobeitschbach	MF	Keine	Normal	494780	397549
pal3	H-FF	pal3	Engmüllnerbach	FF	Keine	Normal	489662	399169
pal4	H-FF	pal4	Dobritschgrabenbach	FF	Keine	Normal	490873	392897
pal5	H-FF	pal5	Triebenbach	M, 3 x FF	Stark besiedelt	Normal	486703	398948
pal6	H-FF	pal6	Lorenzerbach	M, 5 x FF	Oben besiedelt	Normal	484390	401142
		pal7	Torsäulerbach	FF	Keine	Zusammengew.	482955	401646
pal7_pal8_pal13	H-FF	pal8	Tamischbach	FF	Keine	Zusammengew.	482346	401946
		pal13	Almbach	Keine	Besiedelt	Zusammengew.	481465	402401
pal9	H-FF	pal9	Unbekannt	FF	Keine	Normal	478765	402788
pal10	H-FF	pal10	Lahngraben	M, MF, 3 x FF	Keine	Normal	478658	403076
pal11	H-FF	pal11	Strechaubach	3 x FF	Stark besiedelt	Normal	475017	403430
pal12	MF-M	pal12	Sorgergraben	М	Besiedelt	Normal	500498	395525
nor1 nor2		par1	Schrabach	2 x FF	Keine	Zusammengew.	495428	398043
par i_parz	п-гг	par2	Leitnerbach	FF	Besiedelt	Zusammengew.	494538	398051
par3	H-FF	par3	Spöcklbach	FF	Keine	Normal	492847	399174
par4	H-FF	par4	Köberbach	FF	Besiedelt	Seitlich begr.	491827	399592
par5	H-FF	par5	Filtzenbach	3 x FF	Rückhaltebecken, besiedelt	Seitlich begr.	489679	399912
par6	H-FF	par6	Dietmannsdorferbach	9 x FF, H	Rückhaltebecken, besiedelt	Normal	486370	400536
por7 por9		par7	Aichergraben	FF	Keine	Zusammengew.	485059	401504
par/_pare	п-гг	par8	Moarzbichlgraben	FF, MF	Keine	Zusammengew.	484601	401717
par9	H-FF	par9	Bämdorfer Bach	3 x FF, MF	Rückhaltebecken	Normal	482232	402328
par10	H-FF	par10	Büschendorfer Bach	3 x FF	Murbrecher, besiedelt	Normal	479721	403108
par11	H-FF	par11	Besserergraben	2 x FF, MF	Besiedelt	Seitlich begr.	478935	403233
par12	H-FF	par12	Löffelmacherbach	FF, H	Besiedelt	Normal	478240	403381
par13	H-FF	par13	Brandschinkbach	FF	Rückhaltebecken	Normal	493294	398853
par14	H-FF	par14	Wölfergraben (?)	FF	Besiedelt	Normal	487667	400280
par15	MF-M	par15	Wölfergraben (?)	MF	Besiedelt	Normal	487298	400454





4.1.2 Pitztal

Tabelle 5 und Abbildung 6 liefern einen Überblick über die im Pitztal kartierten Mur- und Schwemmkegel. Der Aufbau sowie die enthaltenen Informationen sind analog zu den Angaben, die das Paltental betreffen (siehe Kapitel 4.1.1 Paltental). Die Kartierung der Kegel sowie der morphometrischen Indikatoren bzw. Hilfsparameter im Pitztal ist in Anhang B ersichtlich. Die Ausprägung der morphometrischen Merkmale der einzelnen Kegel im Pitztal ist in Anhang D angeführt.

Im Pitztal konnten 15 Kegel kartiert werden, welche durch Ablagerungsprozesse aus 18 Fließgewässern beeinflusst werden. Diese Divergenz zwischen der Anzahl der Kegelgerinne und der Anzahl der Kegel resultiert aus der Verschmelzung benachbarter Kegel, die nunmehr einen Kegel bilden und somit von mehreren Gerinnen beeinflusst werden. Im Speziellen handelt es sich dabei um die Kegelgerinne mit dem Identifikationskürzel pil3 und pil4 sowie die Kegelgerinne mit dem Identifikationskürzel pir10, pir19 und pir20, welche jeweils einen zusammengewachsenen Kegel (pil3 pil4 und pir10 pir19 pir20) ausbilden (siehe dazu auch die Kartierung der Kegel in Anhang B). Von den Kegeln, die von mehreren Sammelgebieten beeinflusst werden, weist nur ein Kegel (pil3 pil4) Sammelgebiete mit Melton-Zahlen sowohl größer als auch kleiner 0.69 auf. Sechs Kegel weisen eine seitliche Begrenzung durch benachbarte Landschaftsformen auf, wodurch sie nicht für eine Untersuchung der Ausdehnung der Kegel herangezogen werden können. Die Oberfläche von fünf Kegeln ist aufgrund von Verbauungen zum Schutz vor Naturgefahren derart stark verändert, dass diese Kegel nicht für eine Analyse der Heterogenität der Kegeloberfläche herangezogen werden können (siehe Tabelle in Anhang D). Von den 15 Kegeln sind (aufgrund der mehrheitlich dokumentierten Prozesse) bis auf zwei alle von murartigem Feststofftransport und Murgang (Prozessgruppe MF-M) beeinflusst. Zwei Kegeln kann aufgrund der gleich häufig dokumentierten Prozesse aus beiden Prozessgruppen keine eindeutige Prozessgruppe zugeordnet werden (verschiedene Prozesse).

Tabelle 5: Auflistung der Kegel und der zugewiesenen Prozessgruppen (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang) sowie der zur Verortung der Kegelgerinne am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß gesetzten Punkte im Pitztal mit Informationen zur Bezeichnung des Kegelgerinnes, den laut Ereignisdokumentation der WLV in Vergangenheit aufgetretenen Verlagerungsprozessen im Gerinne (H = Hochwasser, FF = fluviatiler Feststofftransport, MF = murartiger Feststofftransport, M = Murgang), der Verbauung der Kegelfläche, Informationen zur räumlichen Beeinflussung des vom Gerinne durchquerten Kegels durch die Umgebung (Seitl. Begrenzt = seitliche Begrenzung des Kegels, Zusammengew. = Verschmelzung mit benachbarten Kegeln, Normal = keine Beeinflussung) sowie den Koordinaten der gesetzten Punkte in der Projektion MGI Austria Lambert.

ID Kegel	Zuordnung Prozess- gruppe	ID Kegelgerinne	Bezeichnung Wildbach	Prozesse Ereignisdok.	Verbauung	Räumliche Beeinflussung	X-Koordinate	Y-Koordinate
pil1	MF-M	pil1	Lussbach	М	Keine	Normal	212534	346369
pil2	verschiedene	pil2	Gschwandbach	H, MF	Keine, unten besiedelt	Normal	210963	355287
nil3 nil4		pil3	Sagebach	М	Damm und Teich	Zusammengew.	210281	356520
piio_pii4		pil4	Saxuirerbach	2 x M	Kleiner Damm an Spitze	Zusammengew.	210217	356880
pil5	MF-M	pil5	Söllbach	2 x M	Rechstufrig Ablenkdämme	Normal	207412	360512
pir1	MF-M	pir1	Wassertalbach	3 x M	Dämme, Rückhaltebecken	Seitl. begrenzt	212549	344447
pir3	MF-M	pir3	Reiselebach	5 x M	Keine	Normal	212559	345739
pir4	MF-M	pir4	Perlekarbach	5 x M, FF	Ablenkdamm, Rückhaltebecken	Seitl. begrenzt	212708	346343
pir5	MF-M	pir5	Kitzelesbach	M, FF, 3 x MF	Keine	Seitl. begrenzt	212557	346406
pir6	MF-M	pir6	Morlebach	4 x M	Rückhaltebecken, Dämme	Normal	212396	348462
pir7	MF-M	pir7	Hundsbach	6 x M	Rückhaltebecken	Normal	212512	349398
pir8	MF-M	pir8	Sturpenrinnerbach	3 x M	Keine	Normal	212609	350061
		pir10	Alpbach	12 x M	Rückhaltebecken, Ablenkdamm	Zusammengew.	212054	353131
pir10_pir19_pir20	MF-M	pir19	Innere Sölderrinne	Keine	Keine	Zusammengew.	212389	352849
		pir20	Äußere Sölderrinne	Keine	Rückhaltebecken	Zusammengew.	212317	352884
pir11	MF-M	pir11	Schwarzbach	М	Rückhaltebecken und Damm	Seitl. begrenzt	211816	353804
pir12	verschiedene	pir12	Ronachbach	M, FF	Keine	Seitl. begrenzt	210802	355627
pir13	MF-M	pir13	Bichlbach	8 x M, H	Ablenkdamm	Seitl. begrenzt	210275	356571



Abbildung 6: Kartografische Darstellung der zur Verortung der Kegelgerinne am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß gesetzten Punkte im Pitztal, eingestuft nach der räumlichen Beeinflussung des vom Gerinne durchquerten Kegels durch die Umgebung (seitliche Begrenzung des Kegels, Verschmelzung mit benachbarten Kegeln = Zusammengewachsene Kegel, keine Beeinflussung = Normale Kegel).

4.2 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Prozessregime

Die Ausprägungen der morphometrischen Indikatoren, welche die Ausdehnung, Neigung und Schroffheit der Kegel, die Heterogenität der Kegeloberfläche, die Ausdehnung und Schroffheit der Einzugsgebiete sowie die Breite der Haupttäler und deren Besetzung durch die Kegel getrennt nach den Prozessgruppen (H-FF bzw. Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport sowie MF-M bzw. murartiger Feststofftransport und Murgang) charakterisieren, sind in Tabelle 6 angeführt und in Abbildung 7 sowie Abbildung 8 dargestellt. Darüber hinaus erfolgt in Tabelle 6 ein Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel und Einzugsgebiete zwischen den beiden Gruppen anhand der Angabe der Differenz der zentralen Tendenzen (Mittelwerte und Mediane) zwischen den Gruppen sowie der statistischen Prüfung der Unterschiede zwischen den Gruppen (Angabe der durchgeführten statistischen Gruppenvergleiche sowie der daraus resultierenden Signifikanzniveaus und p-Werte). Dabei ist in Abhängigkeit der Verteilung der Daten und der daraus resultierenden Auswahl des Testverfahrens entweder die Differenz zwischen den Mittelwerten der Gruppen (beim t-Test) oder die Differenz zwischen den Medianen der Gruppen (beim Mann-Whitney-U-Test) das geeignetere Mittel zum Vergleich der beiden Gruppen.

Beim Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel zwischen den Prozessgruppen ergeben sich hinsichtlich aller Merkmale (Ausdehnung, Neigung, Schroffheit der Kegel und Heterogenität der Kegeloberfläche) signifikante Unterschiede. In Hinblick auf die morphometrischen Merkmale der Einzugsgebiete unterscheidet sich lediglich die Melton-Zahl signifikant zwischen den Prozessgruppen, während sich die Fläche nicht signifikant unterscheidet.

Von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägte Kegel weisen in Hinblick auf den Median der Gruppen eine um etwa 8 ha größere Fläche auf als Kegel, die von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägt sind (siehe Tabelle 6, Abbildung 7 und Abbildung 8). Mit einer Differenz zwischen den Medianen von ca. 214 m ist auch die horizontale Länge des Radialprofils der Kegel, die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägt sind, deutlich größer als jene der Kegel, die von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflusst sind. Der Median der mittleren Neigung der von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägten Kegel übersteigt den Median der mittleren Neigung iener Kegel, die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägt sind, um 6,2 °. Mit einem Unterschied zwischen den Medianen von 9,6 ° ergibt sich in Hinblick auf die Neigung der Radialprofile eine noch deutlichere Differenz zwischen den Gruppen. Die Melton-Zahl der Kegel ist mit einer Differenz der Mediane zwischen den beiden Gruppen von 0,17 bei den Kegeln, die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport beeinflusst sind, etwas niedriger als bei den von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägten Kegeln. Hinsichtlich der Parameter, welche die Heterogenität der Kegeloberfläche beschreiben (Standardabweichung der Kegelneigung und der Krümmung der Kegel sowie normalisierte Spannweite und Standardabweichung der Z-Koordinaten der Querprofile) sind die Mediane der von Murprozessen geprägten Kegel gegenüber den Medianen der von fluvialen Prozessen geprägten Kegel jeweils erhöht. Der Median der Flächen der Einzugsgebiete jener Kegel, die von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflusst sind, ist um ca. 20 ha kleiner als bei den Kegeln, die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägt sind; dieser Unterschied ist jedoch nicht signifikant. Die Melton-Zahl der Einzugsgebiete ist mit einer Mittelwertdifferenz von ca. 0,5 in den von Murprozessen geprägten Einzugsgebieten höher als in den von fluvialen Prozessen geprägten Einzugsgebieten. Die Haupttäler weisen an den Stellen, wo sie von den durch Murprozesse beeinflussten Kegeln besetzt sind, eine mittlere Breite von 412 m auf, während die Haupttäler an den Stellen, wo sie von den durch fluviale Prozesse beeinflussten Kegeln besetzt sind, eine mittlere Breite von 1087 m aufweisen. Jedenfalls erreicht der Besetzungsgrad des Haupttales in beiden Gruppen mit Maxima von 0,83 (Gruppe H-FF) bzw. 0,92 (Gruppe MF-M) nie den Wert 1.

Tabelle 6: Darstellung deskriptiver statistischer Kennwerte der erhobenen morphometrischen Merkmale getrennt nach Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang) und Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel sowie der Einzugsgebiete zwischen den beiden Gruppen anhand der Angabe der Differenz der zentralen Tendenzen (Mittelwerte und Mediane) zwischen den Gruppen sowie der statistischen Prüfung der Unterschiede zwischen den Gruppen bei einer festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (U = Mann-Whitney-U-Test, t = t-Test für unabhängige Stichproben; * = signifikanter Unterschied, ** = sehr signifikanter Unterschied, *** = hochsignifikanter Unterschied, ns = kein signifikanter Unterschied).

Prozessregime:			H-FF	=					MF-N	1			Vergleich				
Morphometrisches Merkmal	Mittelwert	Standardabw.	Median	Minimum	Maximum	u	Mittelwert	Standardabw.	Median	Minimum	Maximum	и	Diff. Mittelwerte	Diff. Mediane	Statistischer Test	p-Wert	Signifikanzniveau
Kegelfläche [ha]	52,2	72,4	22,7	1,1	295,4	17	13,8	8,2	14,8	0,6	26,6	11	38,4	7,9	U	0,037	*
Horizontale Länge Radialprofil [m]	928,7	631,4	738,1	186,2	2545,2	20	503,5	181,3	523,8	93,9	766,6	16	425,1	214,4	U	0,039	*
Mittlere Neigung Kegel [°]	6,2	1,8	6,4	2,9	9,2	20	12,7	4,1	12,6	4,7	20,2	16	-6,5	-6,2	U	0,000	***
Neigung Radialprofil [°]	5,8	2,3	6,2	1,5	8,8	20	14,3	5,0	15,8	4,1	22,0	16	-8,5	-9,6	U	0,000	***
Melton-Zahl Kegel [-]	0,16	0,07	0,18	0,04	0,27	17	0,35	0,16	0,35	0,12	0,61	11	-0,19	-0,17	U	0,001	***
Std. Neigung Kegel [°]	3,5	0,9	3,3	2,1	5,2	20	5,7	1,8	5,6	3,0	8,9	16	-2,2	-2,4	U	0,000	***
Std. Krümmung Kegel [1/100 m]	0,3433	0,0878	0,3317	0,2215	0,5184	20	0,4763	0,1835	0,5158	0,1703	0,8521	16	-0,1331	-0,1841	U	0,015	*
Norm. Spannweite Z-Koord. Querprofil [-]	0,0208	0,0079	0,0199	0,0051	0,0438	20	0,0411	0,0184	0,0405	0,0123	0,0686	11	-0,0204	-0,0206	U	0,004	**
Norm. Std. Z-Koord. Querprofil [-]	0,0060	0,0024	0,0058	0,0016	0,0124	20	0,0123	0,0055	0,0124	0,0036	0,0195	11	-0,0063	-0,0067	U	0,005	**
Fläche EZG [ha]	1072,6	2377,8	297,4	40,0	9789,5	20	355,3	351,2	277,9	35,9	1243,6	16	717,2	19,5	U	0,626	ns
Melton-Zahl EZG [-]	0,62	0,28	0,58	0,17	1,14	16	1,13	0,53	0,96	0,37	2,05	14	-0,51	-0,38	t	0,002	**
Breite Haupttal [m]	1086,5	337,6	1142,0	347,3	1501,0	20	411,7	254,4	370,4	178,2	1267,0	16					
Besetzungsgrad Haupttal [-]	0,32	0,23	0,23	0,00	0,83	20	0,57	0,28	0,66	0,03	0,92	16					



Abbildung 7: Übersicht über die Ausprägung morphometrischer Merkmale getrennt nach Prozessregime (MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang, H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport): Kegelfläche (A), Horizontale Länge Radialprofil (B), Mittlere Neigung Kegel (C), Neigung Radialprofil (D), Melton-Zahl Kegel (E), Standardabweichung Neigung Kegel (F) und Standardabweichung Krümmung Kegel (G).



Abbildung 8: Übersicht über die Ausprägung morphometrischer Merkmale getrennt nach Prozessregime (MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang, H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport): Normalisierte Spannweite der Z-Koordinaten des Querprofils (A), Normalisierte Standardabweichung der Z-Koordinaten des Querprofils (B), Fläche Einzugsgebiet (C), Melton-Zahl Einzugsgebiet (D), Breite Haupttal (E) und Besetzungsgrad Haupttal (F).

Die Boxplots in Abbildung 9 liefern einen Vergleich ausgewählter morphometrischer Merkmale zwischen den Prozessgruppen für die Kegel, die im Paltental liegen. Die Kegelfläche und die horizontale Länge des Radialprofils sind bei den von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägten Kegeln tendenziell größer als bei den von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflussten Kegeln. Während der Median der mittleren Kegelneigungen in der Prozessgruppe MF-M geringer als jener der Gruppe H-FF ist, verhält es sich hinsichtlich der Neigung des Radialprofils umgekehrt. Allerdings sind diese Unterschiede aufgrund der großen Überlappungen zwischen den Prozessgruppen nur undeutlich ausgeprägt. Damit ist bezüglich des Vergleichs der Kegelneigung im Paltental keine eindeutige Aussage möglich. Die Melton-Zahl der Kegel ist bei Betrachtung des Medians bei den von Murprozessen geprägten Kegeln geringfügig kleiner als bei den von fluvialen Prozessen geprägten Kegeln, jedoch umfasst der Streuungsbereich der letztgenannten Gruppe den gesamten Streuungsbereich der erstgenannten. So verhält es sich auch bei der Standardabweichung der Neigung der Kegel, die bei der Gruppe MF-M in Hinblick auf den Median leicht höher als bei der Gruppe H-FF ist. Die übrigen Indikatoren zur Charakterisierung der Heterogenität der Kegeloberfläche (Standardabweichung der Krümmung des Kegels, Normalisierte Spannweite und Standardabweichung der Z-Koordinaten des Querprofils) sind bei den von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägten Kegeln bei Betrachtung des Medians kleiner als bei den von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport beeinflussten Kegeln, wobei bei den letzten beiden Variablen wiederum der Wertebereich der Gruppe MF-M vollständig im Wertebereich der Gruppe H-FF enthalten ist. Dies weist darauf hin, dass die von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflussten Kegel im Paltental allgemein eine geringere Heterogenität der Oberfläche aufweisen.



Abbildung 9: Übersicht über die Ausprägung ausgewählter morphometrischer Merkmale im Paltental getrennt nach Prozessregime (MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang, H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport): Kegelfläche (A), Horizontale Länge Radialprofil (B), Mittlere Neigung Kegel (C), Neigung Radialprofil (D), Melton-Zahl Kegel (E), Standardabweichung Neigung Kegel (F), Standardabweichung Krümmung Kegel (G), Normalisierte Spannweite (H) und Standardabweichung (I) der Z-Koordinaten des Querprofils.

In Abbildung 10 und Abbildung 11 sind die Radial- und Querprofile der Kegel getrennt nach dem vorherrschenden Prozessregime veranschaulicht. Bei Betrachtung der Radialprofile in Abbildung 11 fällt auf, dass die Profile der von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägten Kegel zumeist kontinuierlich und lediglich selten leicht konkav fallen, während die Profile der Kegel, die von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflusst sind, häufig eine konkave Form aufweisen. Die beiden von verschiedenen Prozesstypen beeinflussten Kegel weisen eine konkave und eine kontinuierlich fallende Profilform auf. Jedenfalls sind die Kegel mit einer deutlich konkaven Ausformung allesamt im Pitztal vorzufinden. Hinsichtlich der Neigung der Profile lässt sich feststellen, dass sich Unterschiede lediglich zwischen den Untersuchungsgebieten, nicht jedoch zwischen den Prozessgruppen ergeben. Die Radialprofile der Kegel im Pitztal sind nämlich wesentlich steiler als die Kegel im Paltental. Dieselben Feststellungen können bei Betrachtung der Querprofile (siehe Abbildung 10) gemacht werden. Während die Querprofile im Pitztal nämlich durchwegs deutlich konvex gewölbt sind und zum Teil eine unregelmäßige Oberfläche aufweisen, sind sie im Platental leicht konvex bis flach und weisen eine vorwiegend glatte Oberfläche auf. Dabei ist anzumerken, dass die Kegel im Pitztal mit einem besonders unregelmäßigen Verlauf der Querprofile durch Verbauungsmaßnahmen verändert wurden (es sind dies die Kegel pir1, pir6, pir10 pir19 pir20 und pil5). Hinsichtlich der Prozessgruppen lassen sich in Hinblick auf die Wölbung und Regelmäßigkeit der Profile hingegen keine Unterschiede feststellen. Einige Querprofile weisen eine asymmetrische Form auf. Zudem lässt sich ein Trend zur Abflachung der Querprofile mit zunehmender Distanz von der Kegelspitze feststellen.

Normalisierte Querp	rofile MF-M	Normalisierte Querpr	rofile H-FF	
pir1	pir13	par1_par2 1	par11	pal7_pal8_pal13
pir3	pir10_pir19_pir20	par3	par12	pal9
pir4	pil1	par4	par13	pal10
pir5	pil3_pil4	par5	par14	pal11
pir6	pil5	par6	pal3	Normalisierte Querprofile
pir7	par15	par7_par8	pal4	verschiedene Prozesse
pir8	pal2	par9	pal5	pil2
pir11	pal12	par10	pal6	pir12
Abbildung 10: Normalisie	rte Querprofile der Kegel	getrennt nach vorherrsche	endem Prozessregime be	i 25 % (Nummerierung 1),

50 % (Nummerierung 2) und 75 % (Nummerierung 3) der Länge des Radialprofils, beginnend bei der Kegelspitze. Die Normalisierung beruht auf einer Referenzierung der Z-Koordinaten des Geländes auf die Profillänge.

		pal7		pal8		pal9		pal10	pal11	pal13	Normalisierte Radialprofile verschiedene Prozesse	pir12	pil2
e H-FF		par10		par11		par12		par13	par14	pal3	pal4	pal5	pal6
Normalisierte Radialprofil		par1		par2		par3		par4	par5	par6	par7	par8	par9
: MF-M	/	pir13	/	pir19_pir20	/	pil1	/	pil3	pil4	pil5	par15	pal2	pal12
Normalisierte Radialprofile		pir1	/	pir3	}	pir4	/	pir5	pir6	 pir7	pir8	pir10	pir11

Abbildung 11: Normalisierte Radialprofile der Kegel getrennt nach vorherrschendem Prozessregime. Die Normalisierung beruht auf einer Referenzierung der Z-Koordinaten des Geländes auf die Profillänge.

In Abbildung 12, Abbildung 13 und Abbildung 14 sind die einzelnen, nach dem zugeordneten Prozessregime kategorisierten Kegel, in Abhängigkeit der Ausprägung ausgewählter morphometrischer Indikatoren in Streudiagrammen eingeordnet. Besonders in Abbildung 12 kann eine Aufgliederung der Kegel nach dem vorherrschenden Prozessregime anhand der morphometrischen Indikatoren beobachtet werden. Während nämlich Kegel, die von Hochwasser und fluvialem Feststofftransport geprägt sind, meist Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl kleiner als 1 besitzen, weisen von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflusste Kegel zumeist Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl größer 0,5 auf. Im Bereich der Melton-Zahl des Sammelgebietes zwischen 0,5 und 1 ergibt sich damit jedoch ein beträchtlicher Überlappungsbereich zwischen den Prozessgruppen, in welchem die Hälfte der Kegel (15) zu liegen kommt. Zudem kann bei einem Kegelgefälle von ca. 9,5 ° (9-10 °) eine recht deutliche Grenze zwischen den Prozessgruppen gefunden werden.

Aufgrund der sehr großen Überlagerungsbereiche lässt sich anhand der Fläche der Einzugsgebiete bzw. der Kegelfläche keine Aufgliederung der Kegel nach Prozesstyp feststellen (siehe Abbildung 13), wenngleich die größten Einzugsgebiets- und Kegelflächen (Einzugsgebietsflächen größer als ca. 1300 ha und Kegelflächen größer als ca. 35 ha) jeweils dem Prozesstyp Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport zuzuordnen sind und die kleinsten Kegelflächen (Flächen kleiner als ca. 7 ha) dem Prozesstyp murartiger Feststofftransport und Murgang zugeordnet sind.

Darüber hinaus lassen sich in den genannten Streudiagrammen jedoch auch typische Muster in Hinblick auf die Beziehungen zwischen den morphometrischen Merkmalen erkennen. So können bei fluvial geprägten Kegeln größere Kegelflächen unterhalb größerer Sammelgebiete beobachtet werden, wobei dieser Zusammenhang jedoch eine große Streuung aufweist und bei von Murprozessen geprägten Kegeln nicht beobachtet werden kann (siehe Abbildung 13). Weiters kann beobachtet werden, dass die Kegelneigung mit zunehmender Größe der darüber liegenden Sammelgebiete leicht abnimmt. Dieser Zusammenhang ist bei fluvial geprägten Kegeln stärker ausgeprägt als bei von Murprozessen geprägten Kegeln, welche diesbezüglich eine große Streuung aufweisen (siehe Abbildung 14). Schließlich fällt auch auf, dass es sowohl bei fluvial als auch von Murprozessen geprägten Kegeln einen deutlichen positiven Zusammenhang zwischen der Melton-Zahl des Sammelgebietes und der Kegelneigung gibt (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: Mittlere Neigungen der Kegel gegen die zugehörigen Melton-Zahlen der Einzugsgebiete, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang).



Abbildung 13: Flächen der Kegel gegen die zugehörigen Flächen der Einzugsgebiete, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang).



Abbildung 14: Mittlere Neigungen der Kegel gegen die zugehörigen Flächen der Einzugsgebiete, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang).

4.3 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Untersuchungsgebiet

Die Ausprägungen der morphometrischen Indikatoren, welche die Ausdehnung, Neigung und Schroffheit der Kegel, die Heterogenität der Kegeloberfläche sowie die Breite der Haupttäler und deren Besetzung durch die Kegel getrennt nach Untersuchungsgebiet (Paltental und Pitztal) charakterisieren, sind in Tabelle 7 angeführt. Zudem erfolgt in Tabelle 7 ein Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel zwischen den beiden Gruppen anhand der Angabe der Differenz der zentralen Tendenzen (Mittelwerte und Mediane) zwischen den Gruppen sowie der statistischen Prüfung der Unterschiede zwischen den Gruppen (Angabe der durchgeführten statistischen Gruppenvergleiche sowie der daraus resultierenden Signifikanzniveaus und p-Werte). Dabei ist in Abhängigkeit der Verteilung der Daten und der daraus resultierenden Auswahl des Testverfahrens entweder die Differenz zwischen den Mittelwerten der Gruppen (beim t-Test) oder die Differenz zwischen den Medianen der Gruppen.

Im Gegensatz zu den Indikatoren zur Beschreibung der Neigung und Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Kegeloberfläche, welche sich zwischen den Untersuchungsgebieten signifikant unterscheiden, ergibt sich in Hinblick auf die Indikatoren zur Charakterisierung der Ausdehnung der Kegel (Kegelfläche und horizontale Länge des Radialprofils) kein signifikanter Unterschied zwischen den Untersuchungsgebieten.

Trotz des nicht signifikanten Unterschiedes übersteigt die Ausdehnung der Kegel im Paltental jene der Kegel im Pitztal mit einer Differenz zwischen den Medianen der Medianen der Kegelflächen von 6,6 ha bzw. einer Differenz zwischen den Medianen der horizontalen Länge der Radialprofile von ca. 133 m. Mit einer Mittelwertdifferenz von 7,6 ° in Hinblick auf die mittlere Neigung der Kegel bzw. einer Mittelwertwertdifferenz von 10,1 ° in Hinblick auf die Neigung des Radialprofils sind die Kegel im Pitztal im Mittel deutlich steiler als die Kegel im Paltental. Auch der Mittelwert Melton-Zahlen der Kegel im Pitztal übersteigt die mittlere Melton-Zahl der Kegel im Paltental um 0,25. Hinsichtlich der Parameter, welche die Heterogenität der Kegeloberfläche beschreiben, sind der Median der Standardabweichung der Kegel sowie der normalisierten Spannweite und Standardabweichung der Z-Koordinaten der Querprofile jener Kegel, die sich im Pitztal befinden, gegenüber den Medianen bzw. Mittelwerten der Kegel im Paltental jeweils erhöht.

Das Haupttal weist im Paltental eine mittlere Breite von ca. 1047 m auf, während das Haupttal im Pitztal eine mittlere Breite von etwa 317 m aufweist. Der Besetzungsgrad des Haupttales bleibt im Paltental mit einem Maximum von 0,83 weit unter dem Wert 1, während im Pitztal mit einem Maximum von 0,98 nahezu eine vollständige Besetzung des Haupttales erreicht wird.

Tabelle 7: Darstellung deskriptiver statistischer Kennwerte der erhobenen morphometrischen Merkmale der Kegel sowie der Umgebungsparameter getrennt nach Untersuchungsgebiet und Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel zwischen den beiden Gruppen anhand der Angabe der Differenz der zentralen Tendenzen (Mittelwerte und Mediane) zwischen den Gruppen sowie der statistischen Prüfung der Unterschiede zwischen den Gruppen bei einer festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (U = Mann-Whitney-U-Test, t = t-Test für unabhängige Stichproben; * = signifikanter Unterschied, ** = sehr signifikanter Unterschied, *** = hochsignifikanter Unterschied, ns = kein signifikanter Unterschied).

Untersuchungsgebiet:			Palten	ital					Pitzta	al			Vergleich				
Morphometrisches Merkmal	Mittelwert	Standardabw.	Median	Minimum	Maximum	u	Mittelwert	Standardabw.	Median	Minimum	Maximum	u	Diff. Mittelwerte	Diff. Mediane	Stat. Test	p-Wert	Signifikanzniveau
Kegelfläche [ha]	45,8	68,3	21,4	0,6	295,4	20	14,0	8,5	14,8	2,9	26,6	9	31,9	6,6	U	0,140	ns
Horizontale Länge Radialprofil [m]	861,9	620,2	647,4	93,9	2545,2	23	499,8	161,1	514,5	191,9	766,6	15	362,1	132,9	U	0,089	ns
Mittlere Neigung Kegel [°]	6,3	2,0	6,4	2,9	11,0	23	13,9	2,8	12,8	10,0	20,2	15	-7,6	-6,4	t	0,000	***
Neigung Radialprofil [°]	5,9	2,2	6,4	1,5	8,8	23	16,0	3,2	16,7	10,9	22,0	15	-10,1	-10,3	t	0,000	***
Melton-Zahl Kegel [-]	0,16	0,06	0,18	0,04	0,27	20	0,41	0,12	0,36	0,27	0,61	9	-0,25	-0,19	t	0,000	***
Std. Neigung Kegel [°]	3,5	0,9	3,4	2,1	5,2	23	6,1	1,5	5,8	3,0	8,9	15	-2,6	-2,4	U	0,000	***
Std. Krümmung Kegel [1/100 m]	0,3299	0,0911	0,3183	0,1703	0,5184	23	0,5234	0,1465	0,5189	0,2859	0,8521	15	-0,1935	-0,2006	t	0,000	***
Norm. Spannweite Z-Koord. Querprofil [-]	0,0204	0,0079	0,0196	0,0051	0,0438	23	0,0486	0,0111	0,0496	0,0349	0,0686	10	-0,0282	-0,0300	t	0,000	***
Norm. Std. Z-Koord. Querprofil [-]	0,0058	0,0024	0,0056	0,0016	0,0124	23	0,0147	0,0031	0,0156	0,0106	0,0195	10	-0,0088	-0,0100	t	0,000	***
Breite Haupttal [m]	1046,5	357,8	1128,0	347,3	1501,0	23	316,7	73,4	301,3	178,2	438,3	15					
Besetzungsgrad Haupttal [-]	0,32	0,23	0,22	0,00	0,83	23	0,63	0,26	0,67	0,20	0,98	15					

4.4 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Melton-Zahl des Einzugsgebietes

Die Ausprägungen der morphometrischen Indikatoren, welche die Ausdehnung, Neigung und Schroffheit der Kegel, die Heterogenität der Kegeloberfläche sowie die Breite der Haupttäler und deren Besetzung durch die Kegel getrennt nach der Melton-Zahl der Einzugsgebiete (kleiner 0,69 und größer 0,69) charakterisieren, sind in Tabelle 8 angeführt. Zudem erfolgt in Tabelle 8 ein Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel zwischen den beiden Gruppen anhand der Angabe der Differenz der zentralen Tendenzen (Mittelwerte und Mediane) zwischen den Gruppen sowie der statistischen Prüfung der Unterschiede zwischen den Gruppen (Angabe der durchgeführten statistischen Gruppenvergleiche sowie der daraus resultierenden Signifikanzniveaus und p-Werte). Zumal beim Vergleich nach Melton-Zahl des Einzugsgebietes für alle Indikatoren der Mann-Whitney-U-Tests als statistisches Prüfverfahren ausgewählt wurde, ist bei allen Indikatoren der Median als das geeignete Mittel zum Vergleich der Gruppen zu betrachten.

Die morphometrischen Merkmale, welche die Kegelneigung, die Schroffheit des Kegels und die Heterogenität der Kegeloberfläche charakterisieren, unterscheiden sich in Hinblick auf die Melton-Zahl der Einzugsgebiete allesamt signifikant. Dem gegenüber unterscheiden sich die Kegelfläche und horizontale Länge des Radialprofils (Ausdehnung der Kegel) hinsichtlich der Melton-Zahl der Einzugsgebiete nicht signifikant.

Mit einer Differenz der Mediane von 6,6 ha in Hinblick auf die Kegelfläche bzw. ca. 176 m in Hinblick auf die horizontale Länge des Radialprofils, ist die Ausdehnung der Kegel, die ein Sammelgebiet mit einer Melton-Zahl von größer als 0,69 besitzen, kleiner als die Ausdehnung iener Kegel, die ein Sammelgebiet mit einer Melton-Zahl von kleiner als 0.69 aufweisen. wenngleich diese beiden Differenzen nicht signifikant sind. Die Kegel, denen Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl von größer als 0,69 zugeordnet sind, sind steiler als Kegel, die Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl von kleiner als 0,69 aufweisen. Darauf weisen Differenzen zwischen den Medianen von 5,7 ° in Hinblick auf die mittlere Neigung der Kegel und von 7,4 ° in Hinblick auf die Neigung des Radialprofils hin. Die Melton-Zahl der Kegel ist bei den Kegeln mit weniger schroffen Sammelgebieten (Melton-Zahl kleiner als 0.69) in Hinblick auf den Median um 0,15 geringer als bei den Kegeln mit schrofferen Sammelgebieten (Melton-Zahl größer als 0.69). Die Indikatoren, welche die Heterogenität der Kegeloberfläche charakterisieren (Standardabweichung der Kegelneigung und der Krümmung der Kegel sowie normalisierte Spannweite und Standardabweichung der Z-Koordinaten der Querprofile) sind bei den Kegeln mit Sammelgebieten mit einer Melton-Zahl von größer als 0,69 durchwegs höher als bei den Kegeln mit Sammelgebieten mit einer Melton-Zahl von kleiner als 0,69, was auf homogenere Kegeloberflächen in der letztgenannten Gruppe schließen lässt.

Die Haupttäler weisen an den Stellen, wo sie von Kegeln besetzt sind, die ein Sammelgebiet mit einer Melton-Zahl von kleiner als 0,69 aufweisen, eine mittlere Breite von ca. 1011 m und einen maximalen Besetzungsgrad von 0,83 auf, während die Haupttäler an den Stellen, wo sie von Kegeln besetzt sind, die ein Sammelgebiet mit einer Melton-Zahl von größer als 0,69 aufweisen, eine mittlere Breite von ca. 624 m und einen maximalen Besetzungsgrad von 0,98 aufweisen.

Tabelle 8: Darstellung deskriptiver statistischer Kennwerte der erhobenen morphometrischen Merkmale der Kegel sowie der Umgebungsparameter getrennt nach der Melton-Zahl der Einzugsgebiete bzw. Sammelgebiete und Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel zwischen den beiden Gruppen anhand der Angabe der Differenz der zentralen Tendenzen (Mittelwerte und Mediane) zwischen den Gruppen sowie der statistischen Prüfung der Unterschiede zwischen den Gruppen bei einer festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (U = Mann-Whitney-U-Test; * = signifikanter Unterschied, ** = sehr signifikanter Unterschied, *** = hochsignifikanter Unterschied, ns = kein signifikanter Unterschied).

Melton-Zahl der EZG:			< 0,6	9					> 0,6	i9			Vergleich				
Morphometrisches Merkmal	Mittelwert	Standardabw.	Median	Minimum	Maximum	u	Mittelwert	Standardabw.	Median	Minimum	Maximum	и	Diff. Mittelwerte	Diff. Mediane	Stat. Test	p-Wert	Signifikanzniveau
Kegelfläche [ha]	31,7	31,4	21,4	3,0	110,6	10	40,2	73,1	14,8	0,6	295,4	17	-8,5	6,6	U	0,386	ns
Horizontale Länge Radialprofil [m]	847,7	564,7	689,8	322,7	2405,7	12	671,1	518,2	514,2	93,9	2545,2	24	176,5	175,7	U	0,237	ns
Mittlere Neigung Kegel [°]	5,4	2,3	5,3	2,9	11,5	12	11,1	4,1	11,0	5,1	20,2	24	-5,7	-5,7	U	0,000	***
Neigung Radialprofil [°]	5,1	4,0	4,2	1,5	16,7	12	12,1	5,0	11,6	6,0	22,0	24	-7,0	-7,4	U	0,000	***
Melton-Zahl Kegel [-]	0,15	0,15	0,10	0,04	0,57	10	0,28	0,12	0,25	0,17	0,61	17	-0,14	-0,15	U	0,000	***
Std. Neigung Kegel [°]	3,8	1,4	3,2	2,1	7,1	12	4,9	1,8	4,7	2,1	8,9	24	-1,1	-1,5	U	0,042	*
Std. Krümmung Kegel [1/100 m]	0,3225	0,0892	0,3076	0,2215	0,5184	12	0,4473	0,1629	0,4273	0,1703	0,8521	24	-0,1248	-0,1197	U	0,013	*
Norm. Spannweite Z-Koord. Querprofil [-]	0,0183	0,0072	0,0186	0,0051	0,0349	12	0,0352	0,0170	0,0305	0,0123	0,0686	19	-0,0170	-0,0119	U	0,003	**
Norm. Std. Z-Koord. Querprofil [-]	0,0052	0,0024	0,0050	0,0016	0,0111	12	0,0105	0,0051	0,0089	0,0036	0,0195	19	-0,0053	-0,0040	U	0,002	**
Breite Haupttal [m]	1010,8	451,6	1177,5	347,3	1501,0	12	623,6	1331,0	389,5	390,5	178,2	24					
Besetzungsgrad Haupttal [-]	0,31	0,21	0,27	0,00	0,83	12	0,50	0,29	0,60	0,03	0,98	24					

4.5 Vergleich der Neigung der Längsprofile oberhalb der Kegelspitze mit der Neigung unterhalb der Kegelspitze

Die Ausprägung der Neigung der Längsprofile jeweils oberhalb und unterhalb der Kegelspitze sowie der Differenz zwischen den Neigungen des Längsprofils oberhalb und unterhalb der Kegelspitze ist in Anhang E tabellarisch angeführt.

Wie in Abbildung 15 ersichtlich ist, weisen alle untersuchten Längsprofile unterhalb der Kegelspitze eine geringere Neigung als oberhalb der Kegelspitze auf. Bei einer vom Prozesstyp unabhängigen Betrachtung der Profile ergeben sich mit einer mittleren Neigungsdifferenz von ca. 12 ° hochsignifikante Unterschiede zwischen der Neigung oberund unterhalb der Kegelspitze (siehe Tabelle 9). Auch bei einer nach Prozessgruppen getrennten Betrachtung ergeben sich jeweils hochsignifikante Unterschiede zwischen der Neigung oberhalb und unterhalb der Kegelspitze, wobei in den von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägten Gerinnesystemen größere Differenzen (ca. 14 °) als in den von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägten Gerinnesystemen (ca. 10 °) festgestellt werden konnten.

Bei genauerer Betrachtung der Längsprofile (siehe Abbildung 16 und Abbildung 17) fällt jedoch auf, dass in den Profilen beider Prozessgruppen in der Regel kein abrupter Neigungswechsel (Knickpunkt) an der Kegelspitze zu finden ist. Bei vier Profilen der von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägten Gerinnesysteme (pir6, pir13, pal2 und pal12) ist tatsächlich ein Knickpunkt an der Kegelspitze zu beobachten. Bei zwei Profilen dieser Prozessgruppe (pil5 und pir8) ist ein Knickpunkt vorhanden, allerdings etwas oberhalb der eingezeichneten Kegelspitze. Somit ist bei den meisten (13 der 19) Profilen der Prozessgruppe kein Knickpunkt zu finden. Die Längsprofile der von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägten Gerinnesysteme weisen vorwiegend einen kontinuierlichen bzw. ausgeglichenen Verlauf ohne Diskontinuitäten auf. Hier ist ein schwacher Knick nur bei drei (pal13, par8 und par12) von 24 Kegeln angedeutet. Die Längsprofile der von verschiedenen Prozessen (sowohl Murprozesse als auch fluviatile Prozesse) geprägten Gerinnesysteme weisen Knickpunkte auf, allerdings stimmen diese nicht mit den kartierten Kegelspitzen überein.



Abbildung 15: Neigungen unterhalb der Kegelspitze gegen die zugehörigen Neigungen oberhalb der Kegelspitze, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang). Die strichlierte Linie stellt die Winkelhalbierende dar und zeigt ein Verhältnis der Neigung unterhalb der Kegelspitze zur Neigung oberhalb der Kegelspitze von 1:1 an.

Tabelle 9: Darstellung deskriptiver statistischer Kennwerte der Neigung des Längsprofils oberhalb und unterhalb der Kegelspitze und entsprechender Vergleich der Neigungen anhand der Angabe des Mittelwertes und der Standardabweichung der Differenzen zwischen der Neigung oberhalb und unterhalb der Kegelspitze sowie der statistischen Prüfung der Unterschiede zwischen der Neigung oberhalb und unterhalb der Kegelspitze bei einer festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang; W = Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test, t = t-Test für gepaarte Stichproben; * = signifikanter Unterschied, ** = sehr signifikanter Unterschied, *** = hochsignifikanter Unterschied, ns = kein signifikanter Unterschied).

Neigung Längsprofil	Ne	igung d	Neig	gung u	nterha	lb Keg	elspitz	ze	Differe	nzen	Statist. Vergl. der Differenze						
Morphometrisches Merkmal	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standardabw.	n	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standardabw.	n	Mittelwert der Differenzen	Standardabw. der Differenzen	Statistischer Test	p-Wert	Signifikanzniveau
Neigung Längsprofil [°]	21,9	21,9	2,4	43,8	9,5	45	10,0	8,2	1,5	22,0	5,5	45	11,8	5,3	t	0,000	***
Neigung Längsprofil H-FF [°]	15,8	19,3	2,4	16,5	7,1	24	6,0	6,5	1,5	8,8	2,1	24	9,9	5,3	W	0,000	***
Neigung Längsprofil MF-M [°]	28,7	28,0	12,9	43,8	7,2	19	14,6	16,5	4,1	22,0	4,7	19	14,1	4,5	t	0,000	***







5 Diskussion

5.1 Vergleich der morphometrischen Merkmale

5.1.1 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Prozessregime

Beim Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel zwischen den Prozessgruppen ergeben sich hinsichtlich aller Merkmale (Ausdehnung, Neigung, Schroffheit der Kegel und Heterogenität der Kegeloberfläche) signifikante Unterschiede. Kegel, welche von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägt sind, weisen, wie an der Kegelfläche und der horizontalen Länge des Radialprofils ersichtlich ist, eine geringere Ausdehnung auf als Kegel, die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport beeinflusst werden. Dies stimmt mit Harvey et al. (2005) überein, wonach sich infolge von Murgängen kleine Kegel ausbilden. während fluviatile Prozesse große Kegel bedingen. Generell liegt die radiale Ausdehnung der Kegel (horizontale Länge des Radialprofils) innerhalb des in der Fachliteratur angegebenen Bereiches von mehreren 10 m bis zu mehreren 10 km, wobei die erhobenen Kegel mit einer maximalen Länge des Radialprofils von ca. 2,5 km weit unter dem in der Literatur angegebenen oberen Grenzwert liegen (Slaymaker 2004, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013). Dabei kann die Vermutung, dass die Ausdehnung der Kegel aufgrund einer räumlichen Eingrenzung durch die Umgebung limitiert sein könnte (so wie beispielsweise von Marchi und Tecca 1993 in den italienischen Ostalpen festgestellt), ausgeräumt werden. Der Besetzungsgrad erreicht sowohl im Paltental wie auch im Pitztal nämlich nie 1 und liegt nur in seltenen Fällen über 0,9 (drei Kegel im Pitztal) bzw. über 0,8 (fünf Kegel im Pitztal und ein Kegel im Paltental, siehe Tabellen in Anhang C und Anhang D). Dies weist darauf hin, dass die Ausdehnung der Kegel wohl kaum auf eine räumliche Eingrenzung durch die Umgebung zurückgeführt werden kann und die Ursache für die gemessenen Variationen wahrscheinlich in anderen Einflussfaktoren, wie z. B. dem Prozessregime, gefunden werden kann.

Die im Datenmaterial beobachteten, sehr deutlichen und recht großen Unterschiede in der Kegelneigung (von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägte Kegel weisen eine um 6° höhere mittlere Kegelneigung bzw. eine um fast 10 ° größere Neigung des Radialprofils auf, als die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägten Kegel) spiegeln den allgemeinen Konsens in der Fachliteratur wider, dass von Murprozessen geprägte Kegel in der Regel ein höheres Gefälle aufweisen als Kegel, die von fluvialen Prozessen geprägt sind (Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Slaymaker 2004, Busche et al. 2005). Mit gemessenen Werten zwischen etwa 4 ° und ca. 20 bis 22 ° gibt es eine grobe Übereinstimmung der Neigung der von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflussten Kegel mit den Angaben von Marchi et al. (1993) (Neigung der von Murprozessen beeinflussten Kegel in den italienischen Ostalpen im Bereich zwischen 5,1° und 18,4°), Blair und McPherson (2009) (Neigung von Kegeln, an deren Aufbau Murprozesse beteiligt sind, im Bereich zwischen 4 ° und 30 °) sowie Jackson et al (1987) (Kegelneigung von über 4 ° bei von murartigen Prozessen geprägten Kegeln in den kanadischen Rocky Mountains). Von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport beeinflusste Kegel sind im untersuchten Datenmaterial mit Kegelneigungen im Bereich zwischen ca. 1,5 bis 3 ° und etwa 9 ° jedoch steiler als die z. B. von Marchi et al. (1993) (0,22 bis 7,93 °) oder von Jackson et al. (1987) (meist kleiner als 2,5 °) festgestellten Werte.

Hinsichtlich der Indikatoren, welche die Heterogenität der Kegeloberfläche charakterisieren (Standardabweichung der Neigung sowie der Krümmung der Kegel, normalisierte Spannweite und Standardabweichung der Z-Koordinaten des Querprofils), weisen die Kegel, die von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägt sind, generell höhere Werte auf, was auf eine größere Heterogenität bzw. Rauigkeit der Oberfläche schließen lässt. Dies ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass von Murprozessen geprägte Kegel durch lappenartige Strukturen, Leveès und im Allgemeinen grobe Ablagerungen gekennzeichnet sind (Jackson et

al. 1987, Marchi et al. 1993). Laut Blair und McPherson (2009) sowie de Haas et al. (2014) kann sich die Rauigkeit der Oberfläche neben der Oberflächengestaltung durch primäre (aufbauende) Prozesse (wie z. B. Murgang) jedoch auch aus der nachträglichen Veränderung der Kegeloberfläche durch sekundäre Prozesse (wie z. B. Rillenbildung durch Erosion) ergeben.

Bei Betrachtung der morphometrischen Merkmale der Einzugsgebiete lässt sich feststellen, dass es lediglich hinsichtlich der Melton-Zahl der Einzugsgebiete signifikante Unterschiede zwischen den Prozessgruppen gibt, während sich die Einzugsgebietsflächen nicht signifikant unterscheiden. Dies kann damit erklärt werden, dass die Einzugsgebietsflächen der Prozessgruppe Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport eine große Streuung aufweisen. Die Einzugsgebiete, welche den von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflussten Kegeln zugeordnet sind, weisen mit Flächen zwischen 36 und 1244 ha einen ähnlichen Schwankungsbereich wie die von Marchi et al. (1993) dem Prozesstyp Murgang zugeordneten Einzugsgebiete (Flächen zwischen 20 und 1400 ha). Dennoch weisen die Einzugsgebiete der Prozessgruppe Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport einen höheren Median auf als die Gruppe murartiger Feststofftransport und Murgang. Umgekehrt verhält es sich bei der Melton-Zahl der Einzugsgebiete, deren Mittelwert in der Gruppe murartiger Feststofftransport und Murgang höher ist. Diese Beobachtungen stimmen mit den Aussagen aus der Fachliteratur bezüglich der Beeinflussung des Prozessregimes durch die Topographie überein, wonach Einzugsgebiete, in denen Murprozesse auftreten, generell kleiner und steiler sind als Einzugsgebiete, in denen fluviale Prozesse vorherrschen (Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Slaymaker 2004, Gutiérrez 2013). Eine Ursache hierfür kann in der Abhängigkeit der Geschiebeverfügbarkeit und -zwischenspeicherung sowie des Verhältnisses zwischen Wasser und Geschiebe von den Verhältnissen im Einzugsgebiet gefunden werden (Slaymaker 2004, Blair und McPherson 2009).

In Kontext des Vergleiches der Kegel nach dem aktuell vorherrschenden Prozessregime sei jedoch auch auf das Alter der Kegel und die zeitliche Abfolge der Kegelentwicklungsphasen hingewiesen. Für alpine Kegel wird allgemein angenommen, dass sie ein Alter von nicht mehr als 10.000 Jahre aufweisen, zumal bestehende Ablagerungen in den Haupttälern im Zuge der letzten Eiszeit abtransportiert wurden (Busche et al. 2005, Marchi und Tecca 1995). In einer Studie über den "Gadria-Murkegel" oberhalb von Schlanders in Südtirol (Italien) konnte gezeigt werden, dass sich die wesentlichen Phasen der Kegelbildung zwischen ca. 12.000 Jahre B.P. und etwa 6.000 Jahre B.P., mit einem Höhepunkt um 9.000 Jahre B.P. abspielten (Brardinoni et al. 2018). Ausgehend von diesen Feststellungen ist es wahrscheinlich, dass morphometrische Merkmale der alpinen Kegel, wie die Ausdehnung und Neigung, bereits in der frühen postglazialen Entwicklung weitgehend festgelegt waren. Seitdem gab es vermutlich insbesondere Veränderungen der Ausgestaltung der Kegeloberfläche durch sekundäre Prozesse, jedoch nur leichte Veränderungen der Kegelfläche und -neigung. Die aktuell vorherrschenden und dokumentierten Prozesse sind folglich sekundäre Prozesse, welche die Kegelmorphologie verändern, jedoch nicht für den grundlegenden Kegelaufbau und somit vermutlich nicht für die Ausgestaltung aller Morphologien verantwortlich sind. In diesem Zusammenhang ist auch das von Blair und McPherson (2009) entwickelte Konzept zur Kegelevolution interessant. Hierin wird angenommen, dass im Zuge der verzahnten Entwicklung von Kegel und Einzugsgebiet eine Abfolge verschiedener Prozesse auftritt: Während Murprozesse in einem frühen Entwicklungsstadium auftreten, werden erst zu einem späteren Zeitpunkt (sobald die Einzugsgebiete aufgrund der abbauenden Prozesse größer und weniger schroff sind) fluviale Prozesse prägend. Die Dominanz unterschiedlicher Prozesse in den Untersuchungsgebieten könnte demnach auf unterschiedliche Phasen der Kegelbildung im Zuge des Entwicklungsprozesses hindeuten. Dennoch ist anzunehmen, dass die nacheiszeitliche Kegelbildung im Pitztal und Paltental zeitlich ähnlich verlaufen sein dürfte, zumal sich beide Untersuchungsgebiete in geringer Entfernung innerhalb der Alpen befinden.

5.1.2 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Untersuchungsgebiet

Hinsichtlich der Neigung und der Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Kegeloberfläche ergeben sich deutlichere Unterschiede beim Vergleich zwischen den Untersuchungsgebieten als zwischen den Prozessgruppen. Im Gegensatz zur Neigung und Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Kegeloberfläche unterscheiden sich die Indikatoren zur Charakterisierung der Ausdehnung der Kegel (Kegelfläche und horizontale Länge des Radialprofils) zwischen den Untersuchungsgebieten jedoch nicht signifikant. Dies kann mit dem Vorhandensein vergleichsweise kleiner Kegel im Paltental erklärt werden, was eine recht hohe Streuung der Messwerte in Bezug auf diese Merkmale bewirkt. In beiden Untersuchungsgebieten besetzen Kegel mit einer geringen Ausdehnung die Haupttäler zu einem geringen Ausmaß, während die Kegel mit der größten Ausdehnung tendenziell auch die größten Besetzungsgrade aufweisen (siehe Anhang C und Anhang D). Daher kann ausgeschlossen werden, dass die kleinen Kegel im Paltental aus einer räumlichen Eingrenzung durch die Umgebung resultieren. Es fällt in Zusammenhang mit dem Prozessregime jedoch auch die Tatsache auf, dass die vergleichsweise kleinen Kegel im Paltental entgegen den Erwartungen (es ist nämlich zu erwarten, dass kleine Kegel von murartigen Prozessen geprägt sind, siehe z. B. Harvey et al. 2005) vorwiegend von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport beeinflusst werden. Betrachtet man beispielsweise die Kegel im Paltental mit einer Fläche von weniger als einem Hektar (siehe Anhang C und Anhang D), so unterliegen nur zwei von sechs einer Beeinflussung durch murartigen Feststofftransport und Murgang, während die restlichen Kegel von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport beeinflusst sind. Laut Marchi und Tecca (1995) sind kleinere Kegelflächen durchaus auch bei fluviatilen Prozessen plausibel, zumal die zugehörigen Sammelgebiete größer sind und weniger Geschiebe bereitstellen, wodurch sich keine großen Kegel ausbilden können. Tendenziell sind den kleinen Kegeln im Paltental jedoch auch kleine Sammelgebiete zugeordnet, weshalb diese Hypothese für dieses Untersuchungsgebiet wohl keine Gültigkeit besitzt. Jackson et al. (1987) führen an, dass die Kegelfläche auch durch Erosionsprozesse an der Grenze zum Vorfluter verändert werden kann, was auf die kleineren Kegel im Paltental lagebedingt jedoch nicht zutrifft.

Die festgestellten Gemeinsamkeiten und Divergenzen zwischen dem Vergleich der Kegel nach Prozessregime und nach Untersuchungsgebiet weisen darauf hin, dass die grundsätzlich deutlichen Unterschiede in der Kegelmorphologie aufgrund der Beeinflussung durch Effekten, welche aus den Eigenschaften unterschiedliche Prozesse von des Untersuchungsgebiets (z. B. Geologie, Lithologie, Tektonik, Topographie, Klima und Landnutzung) resultieren, überlagert werden (Marchi et al. 1993, Marchi und Tecca 1995, Harvey et al. 2005, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013, Ahnert 2015). Während sich die Ausdehnung der Kegel zwischen den Untersuchungsgebieten nicht signifikant und weniger stark unterscheidet als zwischen den Prozessgruppen, sind die Unterschiede hinsichtlich der Neigung und Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Kegeloberfläche beim Vergleich der Untersuchungsgebiete stärker ausgeprägt als beim Vergleich der Prozessgruppen. Es kann daher die vorsichtige Vermutung ausgesprochen werden, dass die Ausdehnung der Kegel am ehesten durch das vorherrschende Prozessregime auf den Kegeln erklärt werden kann, während es hinsichtlich der Neigung und Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Kegeloberfläche einen zusätzlichen Effekt der Eigenschaften der Untersuchungsgebiete gibt.

Es sei in diesem Zusammenhang jedoch auch darauf hingewiesen, dass sich die Gruppierung der Kegel nach dem Prozessregime nur geringfügig von der Gruppierung nach dem Untersuchungsgebiet unterscheidet. Während sich nämlich alle Kegel der Prozessgruppe Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport im Paltental befinden, liegen (abgesehen von drei Kegeln, welche sich im Paltental befinden) alle Kegel, die von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflusst sind, im Pitztal. Eine mögliche Erklärung hierfür kann in einer unterschiedlichen Auftrittswahrscheinlichkeit der Prozesse in den beiden Untersuchungsgebieten gefunden werden, welche sich aus den (hier nicht näher untersuchten) Eigenschaften der Untersuchungsgebiete ergibt. Es ist somit eine Abhängigkeit

der Gruppierungsvariable Prozessregime von der Gruppierungsvariablen Untersuchungsgebiet in Betracht zu ziehen.

Die Vermutung, dass die Ausdehnung der Kegel am ehesten durch das Prozessregime (und nicht etwa durch die Variation der Umgebungsparameter) beeinflusst wird, kann zusätzlich dadurch untermauert werden, dass sich auch beim Vergleich zwischen den Prozessgruppen, der lediglich die Kegel innerhalb des Paltentales mit einbezieht (also bei konstant gehaltenen Umgebungsparametern, zumal Geologie, Lithologie, Tektonik, Landnutzung und Klima hier überall ähnlich sind), ein gleich gerichteter Unterschied hinsichtlich der Ausdehnung der Kegel ergibt (von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport beeinflusste Kegel sind – wie beim Vergleich aller Kegel – größer als von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflusste Kegel).

Andererseits deutet die Tatsache, dass einige Vergleiche zwischen den Prozessgruppen innerhalb eines Untersuchungsgebietes verschiedene Ergebnisse liefern, als die Vergleiche zwischen den Prozessgruppen in beiden Untersuchungsgebieten, darauf hin, dass die Eigenschaften der Untersuchungsgebiete möglicherweise einen großen Einfluss auf die Morphologie der Kegel haben. Die Vergleiche in Hinblick auf die Schroffheit der Kegel und die meisten Vergleiche in Hinblick auf die Heterogenität der Kegeloberfläche verhalten sich nämlich umgekehrt und widersprechen sich somit. So ist die Melton-Zahl der von Murprozessen beeinflussten Kegel beim Vergleich im Paltental kleiner, beim Vergleich in beiden Untersuchungsgebieten hingegen größer als die Melton-Zahl der von fluvialen Prozessen geprägten Kegel. Die Standardabweichung der Krümmung der Kegel sowie die normalisierte Spannweite und Standardabweichung der Z-Koordinaten der Querprofile der von Murprozessen beeinflussten Kegel sind beim Vergleich im Paltental kleiner, beim Vergleich in beiden Untersuchungsgebieten hingegen größer als die Ausprägung dieser Parameter bei den von fluvialen Prozessen geprägten Kegel.

Es sollte hierbei jedoch noch einmal in Erinnerung gerufen werden, dass im Paltental lediglich drei Kegel der Prozessgruppe Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport zugewiesen sind, was den Vergleich zwischen den Prozessgruppen im Paltental aufgrund der mangelnden Repräsentativität stark relativiert.

5.1.3 Vergleich der morphometrischen Merkmale nach Melton-Zahl des Einzugsgebietes

Die morphometrischen Merkmale, welche die Kegelneigung, die Schroffheit des Kegels und die Heterogenität der Kegeloberfläche charakterisieren, unterscheiden sich in Hinblick auf die Melton-Zahl der Einzugsgebiete oberhalb der Kegel zwar weniger stark als beim Vergleich zwischen den Prozessgruppen, jedoch sind die Unterschiede in Bezug auf diese Merkmale alle signifikant. Diese generell hohe Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen den Vergleichen bestätigt die Klassifizierung der Prozesse laut Ereignisdokumentation der WLV bzw. deutet darauf hin, dass die Prädisposition der Einzugsgebiete für das Auftreten gewisser Transportprozesse ein grundsätzlich geeigneter Indikator für die tatsächlich auftretenden (dokumentierten) Prozesse darstellt.

Eine Ausnahme diesbezüglich stellen die Kegelfläche und horizontale Länge des Radialprofils (Ausdehnung der Kegel) dar, welche sich beim Vergleich nach Prozessregime signifikant, beim Vergleich nach Melton-Zahl des Einzugsgebietes jedoch nicht signifikant unterscheiden. Im Paltental treten nämlich viele große Kegel auch bei einer Melton-Zahl der zugehörigen Einzugsgebiete von größer 0,69 auf, was den Erwartungen widerspricht. Laut Heiser et al. (2015) weisen Einzugsgebiete mit einer Melton-Zahl größer 0,69 in den österreichischen Alpen nämlich eine hohe Prädisposition für Murprozesse auf, welche wiederum tendenziell kleine Kegelflächen ausbilden (Harvey et al. 2005). Eine Erklärung hierfür kann in einer Abweichung zwischen Vorhersage und Auftreten von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport gefunden werden, zumal im Paltental in Einzugsgebieten mit einer Melton-Zahl größer 0,69 meistens (in neun von elf Fällen) Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport dokumentiert

wurden (siehe Anhang C). Eine Begründung für diese Abweichung kann vor allem in den geologischen, lithologischen und klimatischen Eigenheiten sowie der Bodenbedeckung des Untersuchungsgebietes vermutet werden, wodurch beispielsweise eine Bereitstellung geringer Geschiebemengen oder ein häufiger Abtransport von Geschiebe erfolgt und somit – trotz einer hohen Melton-Zahl – Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport häufig auftreten. Bei Betrachtung beider Untersuchungsgebiete lässt sich insgesamt jedoch eine hohe Schnittmenge an Kegeln, die Einzugsgebiete mit einer Melton-Zahl größer 0,69 aufweisen und von Murgang und murartigem Feststofftransport beeinflusst sind, feststellen. Auch die signifikanten Unterschiede bezüglich der restlichen morphometrischen Merkmale zwischen den Gruppen mit unterschiedlichen Melton-Zahlen weisen auf eine generelle Gültigkeit der Vorhersage von Murprozessen bei Melton-Zahlen des Einzugsgebietes von über 0,69 hin.

5.2 Vergleich der Radial- und Querprofile nach Untersuchungsgebiet und Prozessregime

Dass sich hinsichtlich der Neigung und der Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Unterschiede beim Veraleich Kegeloberfläche deutlichere zwischen den Untersuchungsgebieten als zwischen den Prozessgruppen ergeben, wird auch durch die normalisierten Radial- und Querprofile sehr deutlich und anschaulich vermittelt. Bei Betrachtung der Profile ist nämlich klar zu erkennen, dass sich Unterschiede in den Formen eher zwischen Kegeln aus unterschiedlichen Untersuchungsgebieten als zwischen Kegeln, welche von bestimmten Prozessen geprägt sind, ergeben. Während die Radialprofile der Kegel im Pitztal in der Regel nämlich steiler und meist konkav sind, sind die Radialprofile der Kegel im Paltental durchwegs flacher und fallen zumeist kontinuierlich, selten auch leicht konkav. Interessant ist hierbei auch die Tatsache, dass die Radialprofile der von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägten Kegel meist ein kontinuierliches Gefälle aufweisen, was in Widerspruch zu den Aussagen von Blair und McPherson (2009) steht, wonach sich bei fluviatilem Feststofftransport ein konkaves Radialprofil ausbildet, zumal große Korngrößen im proximalen Kegelbereich abgelagert werden.

Die Querprofile sind im Pitztal durchwegs deutlich konvex gewölbt und weißen häufig eine unregelmäßige Oberfläche auf, während sie im Paltental leicht konvex bis flach sind und eine meist glatte Oberfläche aufweisen. Die besonders heterogene Ausgestaltung der Oberfläche einiger Kegel im Pitztal ist jedoch nicht auf das vorherrschende Prozessregime, sondern auf technische Maßnahmen zum Schutz vor Naturgefahren (Rückhaltebecken, Leitdämme und Ablenkdämme) zurückzuführen. Ein besonders deutlicher Unterschied hinsichtlich der kleinflächigen Heterogenität der Kegeloberfläche zwischen den Prozessgruppen kann bei Betrachtung ausschließlich der nicht durch Verbauung veränderten Querprofile - im Gegensatz zu den statistischen Vergleichen der entsprechenden Parameter zwischen den Prozessgruppen – iedoch nicht beobachtet werden, obwohl die Rauigkeit der Kegeloberfläche laut Blair und McPherson (2009) von den am Kegel herrschenden primären Prozessen abhängt. Einige Querprofile weisen eine asymmetrische Form auf, was aus der Verteilung der Ablagerungen im Zuge der primären Prozesse resultieren kann (Blair und McPherson 2009). Zudem lässt sich ein Trend zur Abflachung der Querprofile mit zunehmender Distanz von der Kegelspitze feststellen – ein Phänomen, das auch Blair und McPherson (2009) beobachten konnten. Die im Rahmen dieser Arbeit beobachteten Morphologien (kontinuierlich bis konkav fallende Radialprofile sowie konvexe Querprofile) stimmen generell mit den in der Fachliteratur dokumentierten Kegelformen überein (siehe z. B. Busche et al. 2005, Bergmeister et al. 2009, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013, Ahnert 2015). Es konnten jedoch keine konvexen Radialprofile, wie sie von Bergmeister et al. (2009) erwähnt werden, beobachtet werden.

5.3 Referenzwerte zur Klassifikation von Mur- und Schwemmkegeln nach dem Prozessregime

In der Literatur stößt man häufig auf Versuche, Mur- und Schwemmkegel anhand der Ausprägung morphometrischer Merkmale dem Einfluss eines bestimmten Prozessregimes zuzuordnen. Es handelt sich dabei meist um eine Aufgliederung in Kegel, die von Murprozessen, fluvialen Prozessen oder beiden Prozesstypen geprägt sind. Eine Einordnung der von verschiedenen Autoren festgestellten (und explizit als solche ausgewiesenen) Grenzen und Übergangsbereiche in das vorliegende Datenmaterial liefern Abbildung 18 und Abbildung 19.



Abbildung 18: Mittlere Neigungen der Kegel gegen die zugehörigen Melton-Zahlen der Einzugsgebiete, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang) mit Vergleichswerten aus der Literatur zur Differenzierung von Kegeln in Hinblick auf das Prozessregime sowie mit der im untersuchten Datenmaterial als Grenze zwischen den Prozessgruppen festgestellten Kegelneigung von ca. 9,5 °. Grenzen sind als Linien und Übergangsbereiche sind als graue Balken dargestellt.


Abbildung 19: Flächen der Kegel gegen die zugehörigen Flächen der Einzugsgebiete, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang) mit Vergleichswerten aus der Literatur zur Klassifizierung von fluvialen Fächern.

So konnten beispielsweise Jackson et al. (1987) in den kanadischen Rocky Mountains beobachten, dass Kegel, die von Murprozessen beeinflusst sind, generell steiler als 4 °sind und Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl größer als 0,25 bis 0,3 aufweisen. Kegel, die von fluvialen Prozessen geprägt sind, besitzen hingegen ein geringeres Gefälle und niedrigere Melton-Zahlen. Bei acht von elf untersuchten fluvialen Kegeln wurde zudem eine Neigung von weniger als 2,5 ° und eine Melton-Zahl kleiner 0,3 festgestellt. Harvey et al. (2005) behaupten hingegen, dass es - trotz der prozessbedingten Unterschiede in den Kegelmorphologien kein spezielles Gefälle der Kegeloberfläche gebe, nach welchem eine prozessbezogene Klassifikation der Kegel vorgenommen werden kann. Auch Marchi et al. (1993) sowie Marchi und Tecca (1995) konnten für fluvial geprägte Kegel in den italienischen Ostalpen bezüglich der Melton-Zahl der Sammelgebiete eine Obergrenze im Bereich zwischen 0,25 und 0,3 beobachten. Die Untersuchungen von Marchi et al. (1993) weisen für die Mur- und Schwemmkegel der italienischen Ostalpen zudem auf einen Übergangsbereich zwischen fluvial und von Murprozessen geprägten Kegeln bei Melton-Zahlen des Sammelgebietes im Bereich zwischen 0,25 bis 0,3 und 0,45 bis 0,5 hin. Kegel mit einer Melton-Zahl des Sammelgebietes von mehr als 0,45 bis 0,5 sind demnach von Murprozessen geprägt. Für dieselbe Untersuchungsregion konnten Marchi und Tecca (1995) einen Zusammenhang zwischen fluvial geprägten Kegeln und Sammelgebietsflächen von mehr als 20 bis 30 km² finden, während von Murprozessen geprägte Kegel in verschiedenen Größen beobachtet wurden. In British Columbia (Kanada) konnten Wilford et al. (2004) im Rahmen einer Diskriminierung von Einzugsgebieten zwischen unterschiedlichen Prozesstypen anhand der Länge und der Melton-Zahl des Einzugsgebietes feststellen, dass fluviale Einzugsgebiete eine Melton-Zahl kleiner als 0,3 und von Murprozessen geprägte Einzugsgebiete eine Melton-Zahl größer als 0,6 aufweisen. Mit einer Melton-Zahl der Einzugsgebiete von 0,5 geben Welsh und Davies (2011) für Neuseeland eine ähnliche Grenze für die Ausscheidung von solchen Kegeln an, die von Murprozessen betroffen sein können.

Wie in Abbildung 18 und Abbildung 19 ersichtlich, werden die oben erwähnten Grenzwerte bezüglich der morphometrischen Indikatoren zur Aufgliederung der Kegel nach dem dort vorherrschenden Prozessregime im vorliegenden Datenmaterial nur bedingt abgebildet. Während nämlich die Referenzwerte bezüglich der Charakterisierung der von Murprozessen beeinflussten Kegel auch für die Kegel im Pitztal und Paltental angewendet werden können (alle von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflussten Kegel sind steiler als 4 ° und besitzen ein Sammelgebiet mit einer Melton-Zahl größer als 0,25 bis 0,3 bzw. nahezu alle Kegel dieses Prozesstyps sind steiler als 4 ° und besitzen ein Sammelgebiet mit einer Melton-Zahl größer als 0,45 bis 0,5), treffen die Referenzwerte zur Charakterisierung der von fluvialen Prozessen beeinflussten Kegel nicht für die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägten Kegel im Pitztal und Paltental zu. Die meisten dieser Kegel kommen außerhalb des von den Referenzwerten definierten Bereiches zu liegen. Eine Erklärung hierfür kann in der Prozesstransformation von murartigem auf fluviatilen Feststofftransport entlang von flacheren Gerinneabschnitten vermutet werden, womit es trotz hoher Melton-Zahlen zu einer fluvialen Kegelbildung kommen kann (Jackson et al. 1987, Marchi et al. 1993). Bezüglich der Fläche der Sammelgebiete gibt es keine Übereinstimmung mit den Literaturwerten, zumal nur zwei fluvial geprägte Kegel ein Sammelgebiet größer als 20 bis 30 km² aufweisen. Damit eignen sich die in der Literatur angeführten morphometrischen Grenzwerte bzw. Übergangsbereiche nicht zur Unterscheidung der Kegel im Pitztal und Paltental in Hinblick auf das Prozessregime.

Dennoch kann auch im vorliegenden Datenmaterial eine bestimmte Aufgliederung der Kegel nach dem vorherrschenden Prozessregime anhand der morphometrischen Indikatoren beobachtet werden. Kegel, die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägt sind, besitzen meist Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl kleiner als 1, während von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflusste Kegel zumeist Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl größer als 0,5 aufweisen. Dies deckt sich mit den Aussagen von Wilford et al. (2004) sowie von Welsh und Davies (2011), wonach Murprozesse in Einzugsgebieten mit einer Melton-Zahl größer als 0,5 bzw. 0,6 auftreten. Wenngleich im Bereich der Melton-Zahl des Sammelgebietes zwischen 0,5 und 1 ein großer Teil der Kegel zu liegen kommt und sich somit ein beträchtlicher Überlappungsbereich zwischen den Prozessgruppen ergibt, konnten die statistischen Gruppenvergleiche jedoch zeigen, dass es in Hinblick auf die Melton-Zahl der Sammelgebiete oberhalb der Kegel einen sehr signifikanten Unterschied zwischen den Prozessgruppen gibt. Keine Aufgliederung der Kegel nach Prozesstyp lässt sich anhand der Fläche der Einzugsgebiete bzw. der Kegel beobachten. Dies manifestiert sich auch in den nicht signifikanten Unterschieden zwischen den Prozessgruppen bezüglich der Flächen der Einzugsgebiete. Eine recht deutliche Grenze zwischen den beiden Prozessgruppen kann bei einem Kegelgefälle von ca. 9,5 ° (9-10 °) gefunden werden. Diese ist wesentlich höher als die von Jackson et al. (1987) festgestellten Grenzen im Bereich um 4 ° und 2.5 ° (siehe oben) und widerspricht den Einschätzungen von Harvey et al. (2005), wonach keine prozessbezogene Klassifikation der Kegel in Hinblick auf die Kegelneigung vorgenommen werden kann. Dieser deutliche Unterschied in Hinblick auf die Kegelneigung wird zudem durch einen hochsignifikanten Unterschied zwischen den Prozessgruppen bezüglich der mittleren Neigung der Kegel und der Neigung des Radialprofils untermauert. Eine Begründung für diese recht deutliche Aufgliederung entlang der Kegelneigung kann auch in der Methodik der Abgrenzung der Kegel gefunden werden, welche im Pitztal und im Paltental auf Grundlage unterschiedlicher Kriterien bezüglich der Kegelneigungen durchgeführt wurde. Während im Paltental nämlich bereits im Bereich von recht flachen Geländeneigungen typische Kegel-Grundrissformen vorgefunden werden konnten, wurden typische Kegelformen im Pitztal erst in weit steilerem Gelände festgestellt.

Der bei fluvial geprägten Kegeln beobachtete positive Zusammenhang zwischen Kegel- und Sammelgebietsfläche (siehe Abbildung 19) wurde auch von Marchi und Tecca (1995), Blair und McPherson (2009), Gutiérrez (2013) sowie Ahnert (2015) beobachtet. Einschränkend ist jedoch, dass alle Autoren auf eine lediglich schwache Ausprägung und den unsicheren Charakter dieser Beziehung hinweisen, zumal Variationen in Hinblick auf das Kegelalter (je älter die Ablagerungen, umso stärker können sie durch sekundäre Prozesse modifiziert werden), die Gesteinsarten und somit den Erosionswiderstand des Gesteins im Sammelgebiet, das Relief, die Vegetationsbedeckung sowie die Intensität und Häufigkeit von Niederschlägen große Schwankungen bewirken können. Dass die Kegelneigung – wie in Abbildung 14 in Kapitel 4.2 ersichtlich ist – mit zunehmender Größe der darüber liegenden Sammelgebiete leicht abnimmt, wird auch von Bergmeister et al. (2009), Blair und McPherson

(2009) und Gutiérrez (2013) erwähnt, welche einen schwachen Zusammenhang zwischen der Kegelneigung und der Fläche des Sammelgebietes feststellen konnten. Ein positiver Zusammenhang zwischen der Melton-Zahl des Sammelgebietes und der Kegelneigung, der im untersuchten Datenmaterial in beiden Prozessgruppen beobachtet werden konnte (siehe Abbildung 18), wurde bereits von Jackson et al. (1987), Marchi et al. (1993), Marchi und Tecca (1995), Marchi und Brochot (2000) sowie Bergmeister et al. (2009) beschrieben.

5.4 Vergleich der Neigung der Längsprofile oberhalb der Kegelspitze mit der Neigung unterhalb der Kegelspitze

Alle untersuchten Längsprofile weisen unterhalb der Kegelspitze eine geringere Neigung als oberhalb der Kegelspitze auf. Die statistischen Vergleiche konnten sowohl bei Betrachtung aller Profile als auch bei einer nach Prozessgruppen getrennten Betrachtung hochsignifikante Unterschiede zwischen der Neigung oberhalb und unterhalb der Kegelspitze feststellen. Diese Feststellungen weichen somit von den Beobachtungen von Blair und McPherson (2009) ab, die im Death Valley beim Vergleich der Neigung einen Kilometer oberhalb und unterhalb der Kegelspitze nur in 40 % der Fälle signifikant steilere Neigungen oberhalb der Kegelspitzen feststellen konnten.

In den Profilen beider Prozessgruppen ist in der Regel jedoch kein abrupter Neigungswechsel (Knickpunkt) an der Kegelspitze zu finden. Diese Beobachtung unterstützt die aktuellen Annahmen in der Fachliteratur, dass der Ablagerungsprozess am Kegel einerseits durch eine Gefällsverminderung, andererseits aber auch durch eine Verbreiterung des Fließquerschnittes beim Austritt aus dem Sammelgebiet (Wegfallen seitlicher Begrenzungen und dadurch laterale Expansion und Ausbildung eines sogenannten "unconfined flow") eingeleitet wird. In beiden Fällen kommt es zu einer Abnahme der Schleppkraft und somit zur Deposition des mitgeführten Geschiebes. Besonders die Aufweitung des Fließquerschnittes als Ursache für den Beginn der Ablagerung (durch die Aufweitung nimmt nämlich die Fließtiefe und die Fließgeschwindigkeit ab und es kommt vermehrt zu Turbulenz und Reibung, was zur Sedimentation der mitgeführten Fracht führt) vermag die Beobachtung, dass der Beginn der Neigung (Knickpunkt) verbunden sein muss, zu erklären (Busche et al. 2005, Blair und McPherson 2009, Gutiérrez 2013, Ahnert 2015, Zepp 2017).

Die Abweichung zwischen dem beobachteten Knickpunkt und der Lage der kartierten Kegelspitze bei einigen Profilen ist vermutlich auf Unsicherheiten bei der Abgrenzung der Kegelflächen zurückzuführen.

5.5 Methodische Aspekte

Die Neigung des Radialprofils und die aus dem Raster mit Auflösung 50 x 50 m abgeleitete mittlere Neigung des Kegels scheinen als Indikatoren für die Neigung des Kegels gleichermaßen geeignet zu sein. Die Abweichungen zwischen den beiden Parametern bleiben zumeist in einem Rahmen von etwa 1 bis 2° und die statistischen Gruppenvergleiche in Bezug auf diese Parameter liefern ähnliche Ergebnisse. Selbiges gilt für die Kegelfläche und die horizontale Länge des Radialprofils, welche die Ausdehnung des Kegels quantifizieren und hinsichtlich der statistischen Vergleiche ähnliche Ergebnisse liefern. Hinsichtlich des Vergleiches der Heterogenität der Oberfläche der Kegel scheinen die Indikatoren, welche aus dem mittleren Querprofil abgeleitet sind, aufgrund der Ausgabe höherer Signifikanzniveaus eher Unterschiede zwischen den Prozessgruppen und den Kategorien laut Melton-Zahlen der Einzugsgebiete feststellen zu können als die Standardabweichung der Krümmung des Kegels.

Die Indikatoren, welche die Heterogenität der Kegelfläche charakterisieren (Standardabweichung der Neigungen und der Krümmungen auf der Kegeloberfläche sowie die normalisierte Spannweite und Standardabweichung der Z-Koordinaten des mittleren Querprofiles) beinhalten keinerlei Informationen über die räumliche Verteilung der Merkmale,

sodass diese Parameter nur eine bedingte und stark verallgemeinerte Aussagekraft über die Geländeheterogenität besitzen. Beispielsweise kann eine hohe Standardabweichung der Neigungen auf der Kegeloberfläche einerseits den kleinräumigen Wechsel zwischen verschiedenen Neigungen (so wie es auf einer heterogenen Oberfläche der Fall ist) beschreiben, zugleich jedoch auch ein Hinweis auf ein konkav oder konvex fallendes Radialprofil mit ansonsten homogener Oberfläche sein, in dem zwar die selbe Bandbreite an Neigungen auftritt, der Neigungswechsel jedoch zu einer fortlaufenden Vergrößerung oder Verkleinerung der Neigung führt.

Generell beruhen die Identifikation und Abgrenzung der Kegel sowie die Lokalisierung repräsentativer Profilschnitte trotz der Verwendung aussagekräftiger und räumlich hoch aufgelöster Hilfsmittel (z. B. Höhenschichtenlinien, Neigungskartierung, Orthofoto) häufig auf Einschätzungen des Bearbeiters. Besonders der Parameter "Breite des Haupttales" und der daraus abgeleitete Indikator "Besetzungsgrad des Haupttales" sollten aufgrund der rein gutachterlichen Abschätzung (die Breite des Haupttales konnte aufgrund der Bedeckung mit den Kegeln nämlich nur grob abgeschätzt werden) nur vorsichtig interpretiert werden. Besonders im engen Pitztal (Kerbtal) ist die Breite des Haupttales nur bedingt zur Charakterisierung räumlicher Ausbreitungsbarrieren geeignet, zumal hier besonders gegenüberliegende Kegel die Ausbreitung limitieren können, welche bei der Kartierung der Breite des Haupttales jedoch keine Berücksichtigung gefunden haben. Für das breite Paltental scheint der Parameter aufgrund des Trogtal-Charakters (gegenüberliegende Kegel beeinflussen sich somit kaum) besser geeignet zu sein. Damit ergibt sich für das Pitztal eine womöglich doch höhere Beeinflussung der morphometrischen Parameter der Kegel durch die Umgebung, als durch die Parameter "Breite des Haupttales" und "Besetzungsgrad des Haupttales" angezeigt wird.

6 Schlussfolgerungen

Aufbauend auf einer Literaturrecherche konnten Leitlinien erarbeitet werden, welche die Identifikation bzw. das Auffinden von Kegeln sowie deren Abgrenzung vom umgebenden Gelände auf Grundlage eines Geländemodells mit Auflösung 1 x 1 m und daraus abgeleiteter Informationen (Neigung, Exposition und Höhenlinien) sowie Orthofotos erlauben (Fragestellung 1). Eine Verifizierung, ob es sich bei den ausgeschiedenen Objekten tatsächlich um Mur- oder Schwemmkegel handelt, kann jedoch erst nach einer Überprüfung im Zuge von Feldbegehungen sowie stratigraphischen Untersuchungen der Ablagerungen vorgenommen werden, was im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt wurde und somit noch ausständig ist.

Im Zuge einer Literaturrecherche konnten weiters neun morphometrische Merkmale definiert werden, welche die morphologische Charakterisierung von Mur- und Schwemmkegeln auf Basis eines Geländemodells mit Auflösung 1 x 1 m erlauben (Fragestellung 2). Diese Merkmale beschreiben die Ausdehnung, Neigung und Schroffheit der Kegel sowie die Heterogenität der Kegeloberfläche. Um eine umfassendere Interpretation des Zusammenhanges zwischen der Kegelmorphologie und den Verlagerungsprozessen zu ermöglichen, wurden auch morphometrische Merkmale erhoben, welche das Sammelgebiet oberhalb des Kegels sowie das Haupttal, in welche die Kegelgerinne münden, charakterisieren. Darüber hinaus wurde durch die Darstellung von Längs-, Radial- und Querprofilen die allgemeine Form der Kegel beschrieben.

Beim Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel zwischen den Prozessgruppen konnte festgestellt werden, dass sich hinsichtlich aller Merkmale (Ausdehnung, Neigung und Schroffheit der Kegel sowie Heterogenität der Kegeloberfläche) signifikante Unterschiede ergeben (Fragestellung 3 a). Kegel, welche von murartigem Feststofftransport und Murgang geprägt sind, weisen – wie in anderen Regionen Europas und Nordamerikas bereits beobachtet wurde – eine geringere Ausdehnung, eine deutlich größere Neigung, eine höhere Schroffheit und eine größere Heterogenität der Kegeloberfläche auf als Kegel, die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport beeinflusst werden. Zumal das Haupttal nie vollständig von den Kegeln besetzt wird, kann davon ausgegangen werden, dass die Breite des Haupttales die Kegelgröße nicht wesentlich beeinflusst. Bei Betrachtung der morphometrischen Indikatoren, welche die Einzugsgebiete charakterisieren, ergeben sich lediglich hinsichtlich der Melton-Zahl der Einzugsgebiete signifikante Unterschiede zwischen den Prozessgruppen, während sich die Einzugsgebietsflächen nicht signifikant unterscheiden.

Hinsichtlich der Neigung und der Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Kegeloberfläche ergeben sich deutlichere Unterschiede beim Vergleich zwischen den Untersuchungsgebieten als zwischen den Prozessgruppen (Fragestellung 3 b). Dies ist wird auch durch die normalisierten Radial- und Querprofile sehr deutlich und anschaulich vermittelt, zumal sich Unterschiede in den Formen eher zwischen Kegeln aus unterschiedlichen Untersuchungsgebieten als zwischen Kegeln, welche von bestimmten Prozessen geprägt sind, ergeben. Während die Radialprofile der Kegel im Pitztal - unabhängig von der Prozessgruppe – in der Regel steiler und meist konkav sind, sind die Radialprofile der Kegel im Paltental durchwegs flacher und fallen zumeist kontinuierlich, selten auch leicht konkav. Die Querprofile sind im Pitztal durchwegs deutlich konvex gewölbt und weißen häufig eine unregelmäßige Oberfläche auf, während sie im Paltental leicht konvex bis flach sind und eine meist glatte Oberfläche aufweisen. Einige Querprofile weisen eine asymmetrische Form auf. Zudem lässt sich ein Trend zur Abflachung der Querprofile mit zunehmender Distanz von der Kegelspitze feststellen. Ähnliche Profilformen wurden auch von anderen Autoren beobachtet. Im Gegensatz zu den eben genannten Merkmalen unterscheiden sich die Indikatoren zur Charakterisierung der Ausdehnung der Kegel jedoch nicht signifikant zwischen den Untersuchungsgebieten. Dies weist darauf hin, dass die Ausdehnung der Kegel am ehesten durch das vorherrschende Prozessregime auf den Kegeln erklärt werden kann, während es

hinsichtlich der Neigung und Schroffheit der Kegel sowie der Heterogenität der Kegeloberfläche einen zusätzlichen Effekt der Eigenschaften der Untersuchungsgebiete (z. B. Geologie, Lithologie, Tektonik, Topographie, Klima und Landnutzung) gibt. Es sei in diesem Zusammenhang jedoch auch darauf hingewiesen, dass sich die Gruppierung der Kegel nach dem Prozessregime nur geringfügig von der Gruppierung nach dem Untersuchungsgebiet unterscheidet. Um Klarheit in Hinblick auf die Überlagerung von Effekten, die aus dem Prozessregime bzw. aus den Eigenschaften des Untersuchungsgebietes resultieren, zu schaffen, ist es notwendig, im Rahmen zukünftiger Studien Kegel aus Untersuchungsgebieten zu untersuchen, in welchen ein mehr oder weniger ausgewogenes Verhältnis zwischen den Prozessgruppen herrscht.

Die morphometrischen Merkmale, welche die Kegelneigung, die Schroffheit des Kegels und die Heterogenität der Kegeloberfläche charakterisieren, unterscheiden sich in Hinblick auf die Melton-Zahl der Einzugsgebiete oberhalb der Kegel signifikant, jedoch weniger stark als beim Vergleich zwischen den Prozessgruppen. Dem gegenüber unterscheiden sich die Merkmale zur Beschreibung der Ausdehnung der Kegel beim Vergleich nach Prozessregime signifikant, beim Vergleich nach Melton-Zahl des Einzugsgebietes jedoch nicht signifikant (Fragestellung 3 c). Eine Erklärung hierfür liefert die Tatsache, dass im Paltental in Einzugsgebieten mit einer Melton-Zahl größer als 0,69 meistens Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport dokumentiert wurden, was in Widerspruch zur angenommenen erhöhten Prädisposition für Murprozesse bei Melton-Zahlen des Einzugsgebietes von größer als 0,69 steht. Eine Begründung für diese Abweichung kann vor allem in den geologischen, lithologischen und klimatischen Eigenheiten sowie der Bodenbedeckung des Untersuchungsgebietes vermutet werden.

Eine Klassifikation nach Prozessregime, sodass sich signifikante Unterschiede zwischen fluvial und von Murprozessen geprägten Kegeln ergeben, lässt sich anhand jedes einzelnen erhobenen morphometrischen Kegelmerkmals durchführen, wobei besonders die Merkmale zur Charakterisierung der Neigung und Schroffheit hochsignifikante Unterschiede aufzeigen (Fragestellung 4). In diesem Zusammenhang könnten eine multivariate Betrachtung sowie die Entwicklung eines Klassifikationsmodelles mit einer entsprechenden Validierung der Klassifikationsgüte jedoch Ergebnisse mit einer wesentlich höheren Aussagekraft liefern. Im Zuge eines Vergleiches der Daten mit den in der Literatur häufig durchgeführten Klassifikationen der Kegel nach Prozessregime anhand der Kegelneigung sowie der Melton-Zahl und der Fläche des Einzugsgebietes, konnte gezeigt werden, dass es bei einer Kegelneigung von 9 bis 10° eine deutliche Grenze zwischen den Prozessgruppen gibt. Zudem besitzen Kegel, die von Hochwasser und fluviatilem Feststofftransport geprägt sind, meist Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl kleiner als 1, während von murartigem Feststofftransport und Murgang beeinflusste Kegel zumeist Sammelgebiete mit einer Melton-Zahl größer als 0,5 aufweisen. Keine Aufgliederung der Kegel nach Prozesstyp konnte anhand der Fläche der Einzugsgebiete beobachtet werden.

Schließlich konnte festgestellt werden, dass alle untersuchten Längsprofile unterhalb der Kegelspitze eine geringere Neigung als oberhalb der Kegelspitze aufweisen (Fragestellung 5). Sowohl bei einer Betrachtung aller Profile, als auch bei einer nach Prozessgruppen getrennten Betrachtung der Neigungsdifferenzen konnten hochsignifikante Unterschiede zwischen der Neigung oberhalb und unterhalb der Kegelspitze festgestellt werden. Dennoch konnte in den Längsprofilen beider Prozessgruppen in der Regel kein abrupter Neigungswechsel (Knickpunkt) an der Kegelspitze gefunden werden, was darauf hinweist, dass der Ablagerungsprozess am Kegel neben einer Gefällsverminderung wahrscheinlich auch durch eine Verbreiterung des Fließquerschnittes beim Austritt aus dem Sammelgebiet eingeleitet wird. Dieser Sachverhalt könnte durch Laborversuche einer detaillierteren Analyse unterzogen werden.

Die Erfahrungen im Rahmen dieser Arbeit haben gezeigt, dass morphometrische Analysen durch die Auswertung von digitalen Geländemodellen eine durchaus effiziente Alternative oder Ergänzung zur geomorphologischen Feldarbeit darstellen können. Während hoch aufgelöste Geländemodelle einerseits einen guten Überblick über großflächigere Geländeformen liefern und eine rasche Charakterisierung derselben ermöglichen, beschränkt sich deren Aussagekraft andererseits jedoch auf allgemeine Oberflächeninformationen, die je nach Fragestellung erst nach umfangreicheren Untersuchungen im Gelände ergänzt werden können.

7 Literaturverzeichnis

- Abteilung Landesentwicklung und Zukunftsstrategie (2018): Planungsverband 12 Pitztal. Verfügbar in <u>https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/statistik/regionsprofile/plv12/</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- AEIOU (2016): Paltental. In: Austria-Forum, das Wissensnetz. Verfügbar in: <u>https://austria-forum.org/af/AEIOU/Paltental</u>, Abfrage am 12.05.2018.
- Ahnert, F. (2015): Einführung in die Geomorphologie. 5. Auflage. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.
- APA-OTS Originaltext-Service GmbH (2011): Kostenloser, hochauflösender Orthophoto-Dienst von Geoimage Austria(C). Verfügbar in: <u>https://www.ots.at/presseaussendung/OTS_20110630_OTS0025/kostenloser-</u> <u>hochaufloesender-orthophoto-dienst-von-geoimage-austriac</u>, Abfrage am 08.01.2019.
- Bergmeister, K.; Suda, J.; Hübl, J. et al. (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren: Grundlagen, Entwurf und Bemessung; Beispiele. Berlin: Ernst & Sohn.
- Blair, T. C. und McPherson, J. G. (1994): Alluvial fans and their natural distinction from rivers based on morphology, hydraulic processes, sedimentary processes, and facies assemblages. Journal of Sedimentary Research, Section A: Sedimentary Petrology and Processes, Vol. 64A (1994), No. 3. (July): 450-489.
- Blair, T. C. und McPherson, J. G. (2009): Processes and Forms of Alluvial Fans. In: Parsons, A. J. und Abrahams, A. D. (Hrsg.) (2009): Geomorphology of Desert Environments. Springer Science+Business Media B. V.
- BMLFUW (Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft) (2017): IAN Report 185: Ereignisdokumentation 2016. Verfügbar in: https://www.baunat.boku.ac.at/fileadmin/data/H03000/H87000/H87100/DAN_IAN_Report_ts/EREIGNISDOKUMENTATION_2016_kleiner.pdf, Abfrage am 08.01.2019.
- BMNT (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus) (2018a): Mittlerer Jahresniederschlag. Verfügbar in: <u>https://ehyd.gv.at/</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- BMNT (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus) (2018b): Bemessungsniederschlag. Verfügbar in: <u>https://ehyd.gv.at/</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- BMNNT (Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus) (2018c): BMNT-Kundenportal. Verfügbar in: <u>https://kunden.bmnt.lfrz.at/</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- Brardinoni, F.; Picotti, V.; Maraio, S. et al. (2018): Postglacial evolution of a formerly glaciated valley: Reconstructing sediment supply, fan building, and confluence effects at the millennial time scale. GSA Bulletin (2018) 130 (9-10): 1457-1473.
- Brauner, M. (1996): GIS unterstützte Reliefuntersuchung an ausgewählten Ablagerungskegeln des Ötztals. Diplomarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien.
- Busche, D.; Kempf, J.; Stengel, I. (2005): Landschaftsformen der Erde: Bildatlas der Geomorphologie. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- De Haas, T.; Ventra, D.; Carbonneau, P. E. et al. (2014): Debris-flow dominance of alluvial fans masked by runoff reworking and weathering. Geomorphology 217 (2014) 165-181.
- De Haas, T.; Densmore, A. L.; Stoffel, M. et al. (2018): Avulsions and the spatio temporal evolution of debris flow fans. Earth-Science Reviews 177 (2018): 53-75.
- EEA (European Environment Agency) (2016): Corine Land Cover (CLC) 2006, Version 18.5.1. Verfügbar in: <u>https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2006?tab=mapview</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- EnnstalWiki (2018): Paltental. Verfügbar in: <u>http://www.ennstalwiki.at/wiki/index.php/Paltental</u>, Abfrage am 12.05.2018.

- GBA (Geologische Bundesanstalt) (2013): Kartographisches Modell 1:500000 Austria Geologie. Verfügbar in: <u>https://www.geologie.ac.at/produkte-shop/geodaten-</u><u>software/bersichtskarten/</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- Geoimage Austria (2018): Geoimage Orthophoto Metadaten Stand 28.03.2018. Verfügbar in: <u>http://www.geoimage.at/metadaten.html</u>, Abfrage am 08.01.2019.
- Geoimage Austria (2019): Über Geoimage. Verfügbar in: <u>http://www.geoimage.at/allgemeines.html</u>, Abfrage am 08.01.2019.
- Geoland.at (2018): Orthofoto TileCache of Austria, published by geoland.at. Verfügbar in: <u>https://www.data.gv.at/katalog/dataset/254757be-69ef-4a6c-a4c1-1432815d7522</u>, Abfrage am 08.01.2019.

Gutiérrez, M. (2013): Geomorphology. London: Taylor & Francis Group.

- Hammer, W. (s.a.): Die Grauwackenzone zwischen Enns- und Paltental (Steiermark). Verfügbar in: <u>https://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.ashx?command=getcontent&server=im</u> ages&value=JB0821 127 A.pdf, Abfrage am 11.05.2018.
- Harvey, A. M.; Mather, A. E.; Stokes, M. (2005): Alluvial fans: geomorphology, sedimentology, dynamics introduction. A review of alluvial-fan research. Geological Society, London, Special Publications (2005), 251: 1-7.
- Heiser, M.; Scheidl, C.; Eisl, J. et al. (2015): Process type identification in torrential catchments in the eastern Alps. Geomorphology 232 (2015): 239-247.
- Jackson, L. E.; Kostaschuk, R. A.; MacDonald, G. M. (1987): Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology (1987), Volume VII.
- Kaitna, R. (2012): Kapitel 2: Geomorphologische Grundlagen: In: Naturgefahren: Skriptum zur Vorlesung. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Kostaschuk, 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, Vol. 11, 471-484 (1986).
- Krainer, K. (2010): Kapitel 2: Geologie und Geomorphologie von Obergurgl und Umgebung. In: Koch, E.-M. und Erschbamer, B. (2010): Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl. Innsbruck: University press. Verfügbar in: https://www.uibk.ac.at/iup/infofolder/afo_obergurgl/, Abfrage am 11.05.2018.
- Land Steiermark (2018): Gewässernetz Steiermark Routen. In: Digitaler Atlas Steiermark: Verfügbar in: <u>https://gis.stmk.gv.at/atlas/(S(d3evfaixruefwamhcw3ezzpk))/init.aspx?karte=gew&ks=da s&cms=da&redliningid=rt4wvdip5pspbbrwvwy04lkt&box=357202.053846154;5162155;6</u>
 - $\frac{12797.946153846;5297226\&srs=32633}{12797.946153846;5297226\&srs=32633}$, Abfrage am 11.05.2018.
- Land Tirol (2015): Gewässernetz Tirol. In: Tiris Tiroler Rauminformationssystem. Verfügbar in:

https://maps.tirol.gv.at/tirisMaps/synserver;jsessionid=BE390AFA9692467D26F00B615 057EDC2?user=guest&project=tmap master, Abfrage am 11.05.2018.

- Land Tirol (2018): Current and historical orthoimagery of Tyrol. Verfügbar in: <u>https://www.data.gv.at/katalog/dataset/35691b6c-9ed7-4517-b4b3-688b0569729a</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- Leser, H. (2003): Geomorphologie. 8., völlig neu bearbeitete Auflage. Braunschweig: Westermann Schulbuchverlag GmbH.
- Marchi, L.; Pasuto, A.; Tecca, P. R. (1993): Flow processes on alluvial fans in the Eastern Italian Alps. Zeitschrift für Geomorphologie 37. 447-458.

- Marchi, L.; Tecca, P. R. (1995): Alluvial fans of the Eastern Italian Alps: morphometry and depositional processes. Geodinamica Acta, 8:1, 20-27.
- Marchi. L.; Brochot, S. (2000): Les cônes de déjection torrentiels dans les Alpes françaises: Morphométrie et processus de transport solide torrentiel. Revue de géographie Alpine (2000) 3: 23-38.
- Norwegian Water Resources and Energy Directorate (2013): Identifisering av skredvifter. NVE Faktaark 2013. Verfügbar in: http://publikasjoner.nve.no/faktaark/2013/faktaark2013 02.pdf, Abfrage am 30.4.2018.
- Rasch, B.; Friese, M.; Hofmann, W. et al. (2014); Quantitative Methoden 2: Einführung in die Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Rickenmann, D. (2008): Kapitel 5: Muren. In: Naturgefahren: Skriptum zur Vorlesung. Wien: Universität für Bodenkultur.
- Riepl, W. (2012): T-Test oder U-Test? Verfügbar in: <u>https://statistik-dresden.de/archives/232</u>, Abfrage am 30.09.2018.
- Rode, S. (2008): Metamorphose im Ötztalkristallin. Verfügbar in <u>www.geozentrum-</u> <u>tirol.at/downloads.html</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- Schmidegg, O. G. v. (1964): Die Ötztaler Schubmasse und ihre Umgebung. Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt: 27-47. Verfügbar in: <u>https://www.zobodat.at/pdf/VerhGeolBundesanstalt_1964_0027-0047.pdf</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- Schwarz, J.; Bruderer Enzler, H.; Keller, M. et al. (2018a): t-Test für unabhängige Stichproben. Verfügbar in: <u>https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/ttest</u> <u>unabh.html</u>, Abfrage am 30.09.2018.
- Schwarz, J.; Bruderer Enzler, H.; Keller, M. et al. (2018b): Mann-Whitney-U-Test. Verfügbar in: https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/man

<u>https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/ma</u> <u>n.html</u>, Abfrage am 30.09.2018.

- Schwarz, J.; Bruderer Enzler, H.; Keller, M. et al. (2018c): Wilcoxon-Test. Verfügbar in: <u>https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss/unterschiede/zentral/wilko</u> <u>xon.html</u>, Abfrage am 30.09.2018.
- Shi, T. (2010): [R] Whiskers on the default boxplot {graphics}. Beitrag in einem Online-Diskussionsforum. Verfügbar in: <u>https://stat.ethz.ch/pipermail/r-help/2010-</u> <u>May/238746.html</u>, Abfrage am 30.09.2018.
- Slaymaker, O. (2004): Alluvial Fan. In: Goudie, A. S. (Hrsg.): Encyclopedia of Geomorphology: Volume 1. London, New York: Routledge Ltd.
- Sterba, H. (2004): Forstliche Biometrie II. Skriptum, aufgelegt am Institut für Waldwachstumsforschung, Universität für Bodenkultur Wien.
- Welsh, A.; Davies, T. (2011): Identification of alluvial fans susceptible to debris-flow hazards. Landslides (2011) 8:183-194.
- Wilford, D. J.; Sakals, M. E.; Innes, J. L. et al. (2004): Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. Landslides (2004) 1:61-66.
- ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik) (2012): Klimanormalperiode 1981– 2010. Verfügbar in: <u>https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/informationsportal-klimawandel/daten-download/klimamittel</u>, Abfrage am 11.05.2018.
- Zepp, H. (2017): Geomorphologie. 7., überarbeitete Auflage. Leiden, Boston MA, Singapore, Paderborn: Verlag Ferdinand Schöningh.

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über die Eigenschaften charakteristischer Verlagerungsprozesse in Tabelle 2: Übersicht über die ausgewählten morphometrischen Merkmale, gegliedert nach Tabelle 3: Überblick über die im Geoinformationssystem erhobenen Parameter mit Beschreibungen und Anmerkungen zur Definition, Lage und Ermittlung der Parameter, Angabe der Datengrundlagen, aus welchen die Parameter extrahiert wurden und Verwendung der Parameter als morphometrisches Merkmal oder als Hilfsparameter, Tabelle 4: Auflistung der Kegel und der zugewiesenen Prozessgruppen (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang) sowie der zur Verortung der Kegelgerinne am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß gesetzten Punkte im Paltental mit Informationen zur Bezeichnung des Kegelgerinnes, den laut Ereignisdokumentation der WLV in Vergangenheit aufgetretenen Verlagerungsprozessen im Gerinne (H = Hochwasser, FF = fluviatiler Feststofftransport, MF = murartiger Feststofftransport, M = Murgang), der Verbauung der Kegelfläche. Informationen zur räumlichen Beeinflussung des vom Gerinne durchquerten Kegels durch die Umgebung (Seitlich begr. = seitliche Begrenzung des Kegels, Zusammengew. = Verschmelzung mit benachbarten Kegeln, Normal = keine Beeinflussung) sowie den Koordinaten der gesetzten Punkte in der Projektion MGI Tabelle 5: Auflistung der Kegel und der zugewiesenen Prozessgruppen (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang) sowie der zur Verortung der Kegelgerinne am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß gesetzten Punkte im Pitztal mit Informationen zur Bezeichnung des Kegelgerinnes, den laut Ereignisdokumentation der WLV in Vergangenheit aufgetretenen Verlagerungsprozessen im Gerinne (H = Hochwasser, FF = fluviatiler Feststofftransport, MF = murartiger Feststofftransport, M = Murgang), der Verbauung

- Tabelle 7: Darstellung deskriptiver statistischer Kennwerte der erhobenen morphometrischen Merkmale der Kegel sowie der Umgebungsparameter getrennt nach Untersuchungsgebiet und Vergleich der morphometrischen Merkmale der Kegel zwischen den beiden Gruppen anhand der Angabe der Differenz der zentralen Tendenzen (Mittelwerte und Mediane) zwischen den Gruppen sowie der statistischen Prüfung der Unterschiede zwischen den Gruppen bei einer festgelegten Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % (U = Mann-Whitney-U-Test, t = t-Test für

unabhängige Stichproben; * = signifikanter Unterschied, ** = sehr signifikanter Unterschied, *** = hochsignifikanter Unterschied, ns = kein signifikanter Unterschied)..59

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Überblick über die Lage und Ausdehnung der Untersuchungsgebiete......17 Abbildung 2: Zentrale konstituierende Elemente, aus denen sich ein Alluvialfächer zusammensetzt. FC = Zubringergerinne, A = Kegelspitze am Übergang des Sammelzum Ablagerungsgebiet, IC = eingetieftes Gerinne (in Abhängigkeit der vorherrschenden Prozesse ausgeprägt oder nicht vorhanden), IP = Verschneidepunkt zwischen Gerinne und Kegeloberfläche (nur bei Vorhandensein eines eingetieften Gerinnes). ADL = aktiver Ablagerungsbereich. Man beachte die Lage am Gebirgsfuß (aus Blair und McPherson Abbildung 3: Radialprofile (a) und Querprofile (b) von Kegeln aus Kalifornien und Nevada (USA), dargestellt mit zehnfacher vertikaler Überhöhung. Pfeile zeigen den Übergang zu angrenzenden Landschaftsformen an. Die Querprofile entstammen dem proximalen (U) und distalen (L) Kegelbereich (Blair und McPherson 2009, S. 417).....27 Abbildung 4: Übersicht über die Parameter, die im GIS händisch kartiert wurden: Kegelfläche (türkis), Fläche des Sammelgebietes (orange), Radialprofil (blau strichliert), Längsprofil (orange), Querprofile (violett), Breite des Haupttales (grün), vom Kegel besetzte Breite des Haupttales (rot strichliert), höchster Punkt des Längs- und Radialprofils und tiefster Abbildung 5: Kartografische Darstellung der zur Verortung der Kegelgerinne am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß gesetzten Punkte im Paltental, eingestuft nach der räumlichen Beeinflussung des vom Gerinne durchquerten Kegels durch die Umgebung (seitliche Begrenzung des Kegels, Verschmelzung mit benachbarten Kegeln = Abbildung 6: Kartografische Darstellung der zur Verortung der Kegelgerinne am Schnittpunkt zwischen Kegelgerinne und Kegelfuß gesetzten Punkte im Pitztal, eingestuft nach der räumlichen Beeinflussung des vom Gerinne durchquerten Kegels durch die Umgebung (seitliche Begrenzung des Kegels, Verschmelzung mit benachbarten Kegeln = Abbildung 7: Übersicht über die Ausprägung morphometrischer Merkmale getrennt nach Prozessregime (MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang, H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport): Kegelfläche (A), Horizontale Länge Radialprofil (B), Mittlere Neigung Kegel (C), Neigung Radialprofil (D), Melton-Zahl Kegel (E), Standardabweichung Neigung Kegel (F) und Standardabweichung Krümmung Abbildung 8: Übersicht über die Ausprägung morphometrischer Merkmale getrennt nach Prozessregime (MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang, H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport): Normalisierte Spannweite der Z-Koordinaten des Querprofils (A), Normalisierte Standardabweichung der Z-Koordinaten des Querprofils (B), Fläche Einzugsgebiet (C), Melton-Zahl Einzugsgebiet (D), Breite Abbildung 9: Übersicht über die Ausprägung ausgewählter morphometrischer Merkmale im Paltental getrennt nach Prozessregime (MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang, H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport): Kegelfläche (A), Horizontale Länge Radialprofil (B), Mittlere Neigung Kegel (C), Neigung Radialprofil (D), Melton-Zahl Kegel (E), Standardabweichung Neigung Kegel (F), Standardabweichung Krümmung Kegel (G), Normalisierte Spannweite (H) und Standardabweichung (I) der Z-Abbildung 10: Normalisierte Querprofile der Kegel getrennt nach vorherrschendem Prozessregime bei 25 % (Nummerierung 1), 50 % (Nummerierung 2) und 75 % (Nummerierung 3) der Länge des Radialprofils, beginnend bei der Kegelspitze. Die

- Abbildung 12: Mittlere Neigungen der Kegel gegen die zugehörigen Melton-Zahlen der Einzugsgebiete, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang). .56
- Abbildung 14: Mittlere Neigungen der Kegel gegen die zugehörigen Flächen der Einzugsgebiete, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang). .57

- Abbildung 19: Flächen der Kegel gegen die zugehörigen Flächen der Einzugsgebiete, kategorisiert nach zugeordnetem Prozessregime (H-FF = Hochwasser und fluviatiler Feststofftransport, MF-M = murartiger Feststofftransport und Murgang) mit Vergleichswerten aus der Literatur zur Klassifizierung von fluvialen Fächern.......73

Anhang A

Kartierung der Mur- bzw. Schwemmkegel im Paltental mit den wichtigsten morphometrischen Merkmalen sowie Höhenschichtenlinen im Abstand von 20 m











Anhang B

Kartierung der Mur- bzw. Schwemmkegel im Pitztal mit den wichtigsten morphometrischen Merkmalen sowie Höhenschichtenlinen im Abstand von 20 m







Anhang C

Ausprägung der für die statistischen Auswertungen und Darstellungen verwendeten morphometrischen Merkmale je Kegel für das Paltental (aus dem DGM extrahierte und z. T. nachträglich aufbereitete Indikatoren)

Ą
Ľ
an
ō
C

ID Kegel	Untersuchungsgebiet	Prozess	Klassifikation nach Melton-Zahl der EZG	Querprofil beeinflussende Verbauung	Seitliche Begrenzung	Verschiedene Melton-Zahlen der EZG	Melton-Zahl der EZG eindeutig (alle > bzw. < 0,69)	Kegelfläche [m2]	Horizontale Länge Radialprofil [m]	Mittlere Neigung Kegel [°]	Neigung Radialprofil [°]	Melton-Zahl Kegel [-]	Std. Neigung Kegel [°]	Std. Krümmung Kegel [1/100 m]	Norm. Spannweite Z-Koord. Querprofil [-]	Norm. Std. Z-Koord. Querprofil [-]	Breite Haupttal [m]	Besetzungsgrad Haupttal [-]	Fläche EZG [m2]	Mittlere Neigung EZG [°]	Melton-Zahl EZG [-]
pal10	Pa	H-FF	> 0,69	nein	nein	nein		1327327	1505,0	6,3	7,4	0,19	2,1	0,2442	0,0228	0,0074	867,2	0,65	2544353	30,5	0,73
pal11	Pa	H-FF	< 0,69	nein	nein	nein		292194	828,8	3,2	1,5	0,04	3,0	0,2215	0,0163	0,0037	415,1	0,22	55206371	29,4	0,24
pal12	Pa	MF-M	> 0,69	nein	nein	nein		95839	424,2	5,1	6,6	0,17	3,4	0,2542	0,0282	0,0073	379,5	0,64	1076374	22,7	0,85
pal2	Pa	MF-M	< 0,69	nein	nein	nein		188193	732,2	4,7	4,1	0,12	3,4	0,2979	0,0127	0,0036	693,3	0,20	12435694	27,5	0,37
pal3	Pa	H-FF	> 0,69	nein	nein	nein		91485	444,8	8,6	8,8	0,24	3,9	0,3712	0,0305	0,0089	1331,0	0,10	1011494	22,9	0,83
pal4	Pa	H-FF	< 0,69	nein	nein	nein		72753	340,7	6,1	4,2	0,11	4,6	0,5184	0,0202	0,0050	347,3	0,32	4070156	24,3	0,37
pal5	Pa	H-FF	< 0,69	nein	nein	nein		222050	1033,3	5,6	2,6	0,10	5,2	0,4755	0,0220	0,0044	1401,0	0,00	97895486	24,8	0,17
pal6	Pa	H-FF	< 0,69	nein	nein	ja	ja	1106096	1225,7	3,8	3,7	0,08	2,1	0,2359	0,0176	0,0055	1501,0	0,51	5679623	24,5	-
pal7_pal8_pal13	Pa	H-FF	> 0,69	nein	nein	ja	ja	2954302	2545,2	6,4	7,0	0,20	3,1	0,3684	0,0139	0,0039	1156,0	0,67	9591068	27,5	-
pal9	Pa	H-FF	> 0,69	nein	nein	nein		226594	957,3	7,6	7,7	0,27	3,3	0,4779	0,0179	0,0042	1025,0	0,24	434340	26,1	0,92
par1_par2	Pa	H-FF	> 0,69	nein	nein	ja	ja	588686	1161,4	6,7	6,4	0,18	3,5	0,3733	0,0179	0,0056	757,7	0,56	2405011	27,2	-
par10	Pa	H-FF	< 0,69	nein	nein	nein		146450	388,4	6,4	5,3	0,10	4,9	0,3240	0,0212	0,0061	1128,0	0,20	4347523	22,8	0,46
par11	Pa	H-FF	> 0,69	nein	ja	nein		203295	510,0	7,2	8,7	0,18	3,8	0,3034	0,0232	0,0070	953,8	0,21	598336	28,1	0,97
par12	Pa	H-FF	< 0,69	nein	nein	nein		352603	647,4	6,5	7,4	0,15	3,2	0,3393	0,0224	0,0072	809,2	0,37	2486707	23,1	0,62
par13	Pa	H-FF	> 0,69	nein	nein	nein		482509	1160,5	6,7	7,4	0,22	4,8	0,4209	0,0188	0,0059	875,1	0,48	1167557	31,0	0,81
par14	Pa	H-FF	> 0,69	nein	nein	nein		11451	186,2	9,1	6,0	0,18	2,6	0,2394	0,0438	0,0124	1277,0	0,10	483952	19,6	0,81
par15	Pa	MF-M	> 0,69	nein	nein	nein		6329	93,9	11,0	8,4	0,18	4,1	0,1703	0,0123	0,0036	1267,0	0,03	511146	18,5	1,23
par3	Pa	H-FF	> 0,69	nein	nein	nein		88681	486,1	7,3	8,5	0,25	3,7	0,4095	0,0300	0,0087	967,6	0,18	400358	28,6	1,14
par4	Pa	H-FF	< 0,69	nein	ja	nein		143063	626,8	5,3	5,8	0,18	3,2	0,3183	0,0155	0,0049	1360,0	0,19	3757811	26,3	0,51
par5	Pa	H-FF	< 0,69	nein	ja	nein		1792537	2405,7	2,9	2,4	0,08	2,9	0,2829	0,0051	0,0016	1390,0	0,83	13460359	27,3	0,39
par6	Pa	H-FF	< 0,69	nein	nein	nein		550726	974,8	5,2	4,3	0,10	3,0	0,2711	0,0196	0,0060	1465,0	0,41	3404485	20,8	0,54
par7_par8	Pa	H-FF	-	nein	nein	ja	nein	158472	500,0	9,2	7,5	0,19	4,5	0,4026	0,0245	0,0083	1476,0	0,09	808110	18,8	-
par9	Pa	H-FF	< 0.69	nein	nein	nein		205335	645,3	4,1	3.3	0,09	2.6	0.2681	0,0120	0,0032	1227,0	0,16	4760880	21,9	0.38

Anhang D

Ausprägung der für die statistischen Auswertungen und Darstellungen verwendeten morphometrischen Merkmale je Kegel für das Pitztal (aus dem DGM extrahierte und z. T. nachträglich aufbereitete Indikatoren)

ID Kegel	Untersuchungsgebiet	Prozess	Klassifikation nach Melton-Zahl der EZG	Querprofil beeinflussende Verbauung	Seitliche Begrenzung	Verschiedene Melton-Zahlen der EZG	Melton-Zahl der EZG eindeutig (alle > bzw. < 0,69)	Kegelfläche [m2]	Horizontale Länge Radialprofil [m]	Mittlere Neigung Kegel [°]	Neigung Radialprofil [°]	Melton-Zahl Kegel [-]	Std. Neigung Kegel [°]	Std. Krümmung Kegel [1/100 m]	Norm. Spannweite Z-Koord. Querprofil [-	Norm. Std. Z-Koord. Querprofil [-]	Breite Haupttal [m]	Besetzungsgrad Haupttal [-]	Fläche EZG [m2]	Mittlere Neigung EZG [°]	Melton-Zahl EZG [-]
pil1	Pi	MF-M	< 0,69	nein	nein	nein		30037	322,7	11,5	16,7	0,57	7,1	0,3172	0,0349	0,0111	393,2	0,34	9556491	31,4	0,59
pil2	Pi	versch.	> 0,69	nein	nein	nein		29358	191,9	12,8	12,9	0,27	5,2	0,5189	0,0375	0,0106	264,7	0,23	6653127	31,9	0,76
pil3_pil4	Pi	MF-M	-	nein	nein	ja	nein	265702	541,7	12,6	16,1	0,35	5,5	0,4309	0,0405	0,0113	246,7	0,92	6848554	32,0	-
pil5	Pi	MF-M	> 0,69	ja	nein	nein		130628	439,5	10,9	12,7	0,31	5,1	0,5456	0,0513	0,0113	178,2	0,84	4276762	31,2	0,81
pir1	Pi	MF-M	> 0,69	ja	ja	nein		347392	681,3	10,0	12,2	0,30	4,5	0,6221	0,0478	0,0127	340,0	0,91	1956013	40,9	1,09
pir10_pir19_pir20	Pi	MF-M	> 0,69	ja	nein	ja	ja	177287	547,8	14,9	15,4	0,36	5,8	0,6893	0,0656	0,0147	399,4	0,56	2751469	33,0	-
pir11	Pi	MF-M	> 0,69	nein	ja	nein		41252	345,7	15,9	17,9	0,57	7,0	0,3859	0,0514	0,0156	254,6	0,25	430689	38,3	1,78
pir12	Pi	versch.	> 0,69	nein	ja	nein		132226	498,8	13,3	16,9	0,43	6,3	0,4336	0,0492	0,0155	237,2	0,98	2997367	31,1	0,93
pir13	Pi	MF-M	> 0,69	(nein)	ja	nein		141823	514,5	12,2	10,9	0,28	3,0	0,2859	0,0375	0,0124	301,3	0,71	4166134	32,7	0,82
pir3	Pi	MF-M	> 0,69	nein	nein	nein		195121	668,0	18,4	21,6	0,61	8,9	0,5448	0,0686	0,0195	371,7	0,67	627081	45,1	1,72
pir4	Pi	MF-M	> 0,69	ja	ja	nein		182190	652,4	12,8	16,8	0,46	8,0	0,5127	0,0178	0,0052	438,3	0,67	472896	44,1	2,05
pir5	Pi	MF-M	> 0,69	nein	ja	nein		190494	766,6	14,9	17,5	0,60	5,7	0,6639	0,0500	0,0165	372,9	0,64	4062124	35,8	0,75
pir6	Pi	MF-M	> 0,69	ja	nein	nein		148428	533,0	12,6	13,1	0,33	6,6	0,8521	0,0517	0,0140	291,8	0,84	2807366	34,5	1,06
pir7	Pi	MF-M	> 0,69	nein	nein	nein		218884	513,8	15,3	17,5	0,40	5,2	0,5299	0,0556	0,0177	369,0	0,68	4513340	31,3	0,77
pir8	Pi	MF-M	> 0.69	nein	nein	nein		62378	279,2	20,2	22,0	0,46	7,7	0.5188	0.0606	0.0165	290.9	0,20	358626	44,4	1,91

Anhang E

Ausprägung der nach Datenextraktion aus dem DGM abgeleiteten Neigung der Längsprofile jeweils oberhalb und unterhalb der Kegelspitze sowie Angabe der Differenz zwischen den Neigungen des Längsprofils oberhalb und unterhalb der Kegelspitze

ID	_		Neigung [-]		Neigung [°]					
Kegelgerinne	Prozess	oberhalb Kegelspitze	unterhalb Kegelspitze	Differenz	oberhalb Kegelspitze	unterhalb Kegelspitze	Differenz			
pil1	MF-M	0,5321	0,2993	0,2328	28,0	16,7	11,4			
pil2	versch.	0,5676	0,2284	0,3392	29,6	12,9	16,7			
pil3	MF-M	0,5904	0,2437	0,3466	30,6	13,7	16,9			
pil4	MF-M	0,5020	0,3262	0,1758	26,7	18,1	8,6			
pil5	MF-M	0,6683	0,2258	0,4425	33,8	12,7	21,0			
pir1	MF-M	0,4997	0,2164	0,2833	26,5	12,2	14,3			
pir10	MF-M	0,5819	0,2641	0,3179	30,2	14,8	15,4			
pir11	MF-M	0,7009	0,3234	0,3775	35,0	17,9	17,1			
pir12	versch.	0,5350	0,3045	0,2305	28,1	16,9	11,2			
pir13	MF-M	0,4077	0,1920	0,2157	22,2	10,9	11,3			
pir19	MF-M	0,7219	0,2968	0,4251	35,8	16,5	19,3			
pir20	MF-M	0,4340	0,2968	0,1373	23,5	16,5	6,9			
pir3	MF-M	0,7500	0,3960	0,3539	36,9	21,6	15,3			
pir4	MF-M	0,7370	0,3027	0,4343	36,4	16,8	19,5			
pir5	MF-M	0,5499	0,3159	0,2340	28,8	17,5	11,3			
pir6	MF-M	0,5079	0,2323	0,2756	26,9	13,1	13,8			
pir7	MF-M	0,4702	0,3150	0,1552	25,2	17,5	7,7			
pir8	MF-M	0,9583	0,4048	0,5535	43,8	22,0	21,7			
pal10	H-FF	0,3755	0,1302	0,2453	20,6	7,4	13,2			
pal11	H-FF	0,0428	0,0260	0,0168	2,4	1,5	1,0			
pal12	MF-M	0,3874	0,1152	0,2722	21,2	6,6	14,6			
pal13	H-FF	0,3886	0,1115	0,2771	21,2	6,4	14,9			
pal2	MF-M	0,2290	0,0719	0,1571	12,9	4,1	8,8			
pal3	H-FF	0,3602	0,1556	0,2046	19,8	8,8	11,0			
pal4	H-FF	0,0874	0,0733	0,0141	5,0	4,2	0,8			
pal5	H-FF	0,1278	0,0446	0,0832	7,3	2,6	4,7			
pal6	H-FF	0,0927	0,0644	0,0283	5,3	3,7	1,6			
pal7	H-FF	0,3484	0,1149	0,2335	19,2	6,6	12,7			
pal8	H-FF	0,4987	0,1336	0,3651	26,5	7,6	18,9			
pal9	H-FF	0,4010	0,1358	0,2653	21,9	7,7	14,1			
par1	H-FF	0,3921	0,1067	0,2854	21,4	6,1	15,3			
par10	H-FF	0,1891	0,0926	0,0965	10,7	5,3	5,4			
par11	H-FF	0,4519	0,1533	0,2985	24,3	8,7	15,6			
par12	H-FF	0,3505	0,1295	0,2211	19,3	7,4	11,9			
par13	H-FF	0,4030	0,1291	0,2739	21,9	7,4	14,6			
par14	H-FF	0,2149	0,1045	0,1103	12,1	6,0	6,2			
par15	MF-M	0,3931	0,1474	0,2456	21,5	8,4	13,1			
par2	H-FF	0,4069	0,1163	0,2906	22,1	6,6	15,5			
par3	H-FF	0,3567	0,1498	0,2069	19,6	8,5	11,1			
par4	H-FF	0,3085	0,1014	0,2070	17,1	5,8	11,4			
par5	H-FF	0,0991	0,0419	0,0572	5,7	2,4	3,3			
par6	H-FF	0,1804	0,0748	0,1057	10,2	4,3	6,0			
par7	H-FF	0,3131	0,1134	0,1997	17,4	6,5	10,9			
par8	H-FF	0,3722	0,1437	0,2285	20,4	8,2	12,2			
par9	H-FF	0,1512	0,0582	0,0930	8,6	3,3	5,3			