



Universität für Bodenkultur Wien

# Diplomarbeit

## GIS-basierte Untersuchung des geologischen und geomorphometrischen Einflusses auf die Murgangaktivität im Pitztal

Verfasser

**Fabian Arminger**

An der Universität für Bodenkultur, Wien  
Institut für Alpine Naturgefahren

### **Betreuer:**

Assoc. Prof. Dr. Roland Kaitna

Univ.Prof. Mag.rer.nat. Dr.sc.nat. Christian Zangerl

Dipl.-Ing. Philipp Aigner

Wien, Juni 2021



## 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

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Erstellung dieser Masterarbeit unterstützt haben.

Vor allem möchte ich mich bei Dr. Roland Kaitna für die stets angenehme und motivierende Betreuung sowie die konstruktiven Anregungen bezüglich der Gestaltung der Arbeit bedanken.

Dr. Christian Zangerl vom Institut für Angewandte Geologie danke ich recht herzlich für die Betreuung in den verschiedenen geologischen Fragestellungen.

Großer Dank gilt auch DI Philipp Aigner für die Übermittlung der Datensätze, die wertvollen Ratschläge im Laufe der Arbeit sowie für die Unterstützung bei der Feldarbeit.

Ebenfalls möchte ich mich bei DI Erik Kuschel für die Begleitung und hilfreiche Unterstützung im Gelände bedanken.

Ein besonderer Dank geht an Frau Monika Stanzer für die engagierte Hilfe bei organisatorischen Fragen während meines Studiums.

Zuletzt richtet sich mein Dank an meine Eltern und Geschwister, die mir während meines gesamten Studiums stets aufbauend und motivierend zur Seite standen.



## Kurzfassung

Muren stellen eine große Gefährdung für Personen und Güter im alpinen Raum dar. Umso wichtiger ist daher das Verständnis über den Einfluss verschiedener Faktoren auf ihr Auftreten. In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss geologischer und geomorphometrischer Merkmale auf die Murgangaktivität in 23 Einzugsgebieten des Pitztals (Tirol) untersucht. Die Grundlage stellt dabei eine GIS-gestützte Kartierung aller Fest- und Lockergesteinsflächen auf Basis hochauflösender Fernerkundungsdaten und bestehender geologischer Karten dar. Die daraus abgeleiteten geologischen Parameter beschreiben zum einen das Vorkommen der Festgesteine im Einzugsgebiet in Abhängigkeit ihrer Verwitterungstendenz (Einteilung in zwei Klassen), andererseits die Größe der geschieberelevanten Lockergesteinsfläche wie auch die Anteile ihrer enthaltenen Lockergesteinstypen (Hangschutt, Moräne, Blockgletscher, fluviatile/fluvioglaziale Sedimente). Bezüglich der morphometrischen Eigenschaften wurden die Parameter mittlere Neigung, Melton-Zahl, Reliefverhältnis sowie die Länge des murfähigen Gerinnes ermittelt. Mittels statistischer Korrelationsanalysen wurden schließlich die Zusammenhänge zwischen den Parametern und der Ereignishäufigkeit auf Signifikanz geprüft. Repräsentativ für die Ereignishäufigkeit wurde einerseits die Ereignisanzahl je Einzugsgebiet (seit 1950) verwendet, des Weiteren wurden morphometrische Merkmale der Ablagerungskegel als Indikatoren für die Murgangaktivität herangezogen. Während sich gegenüber den Ereignisdaten keinerlei signifikante Zusammenhänge ergeben, konnte anhand der Vergleiche mit den Kegeldaten gezeigt werden, dass mit steigender Melton-Zahl der Sammelgebiete sowie abnehmender murfähiger Gerinnelänge das Auftreten murartiger Prozesse gegenüber jenem fluviatiler Prozesse zunimmt. Ebenso kann eine klare Abnahme der Reliefenergie der Kegel mit steigendem Anteil an verwitterungsanfälligeren Festgesteinen im Einzugsgebiet festgestellt werden, wobei die Ursache jedoch mehr im unterschiedlichen Ablagerungsverhalten der Gesteinsklassen als in deren Auswirkungen auf die Ereignishäufigkeit gesehen wird. Darüber hinaus ist auch bei Zunahme der geschieberelevanten Lockergesteinsvorkommen im Einzugsgebiet ein tendenzieller Anstieg der Murgangaktivität zu erkennen, wohingegen sich hinsichtlich der Anteile der verschiedenen Lockergesteinstypen an der geschieberelevanten Fläche sowie der Parameter Mittlere Neigung und Reliefverhältnis ein deutlich geringerer Einfluss auf das Murganggeschehen andeutet.



## Abstract

Debris flows endanger human lives and facilities in the alpine regions. Therefore, understanding the influence of various factors on debris flow occurrence is important. In the present study, the influence of geological and geomorphometric characteristics on debris-flow activity was investigated for 23 catchments within the Pitztal-valley (Tyrol). The basis for this is a GIS-based mapping of all bedrock and unconsolidated rock areas using high-resolution remote sensing data and geological maps. The derived geological parameters describe the presence of bedrocks in the catchment depending on their weathering characteristics (division into two classes) as well as the extent of sediment contributing areas together with the fraction of unconsolidated sediment (scree, moraine material, rock glaciers, fluvatile/fluvioglacial sediments). Regarding the morphometric characteristics, the parameters Average Slope, Melton Ratio, Relief Ratio as well as the length of the channel susceptible to debris flows were determined. Finally, statistical correlation analyses were used to test the relationships between the derived parameters and event frequency for significance. Event frequency was defined as the number of events per catchment since 1950. Additionally, morphometric characteristics of the alluvial fans were used as indicators for debris-flow activity. While there were no significant correlations with the event data, fan characteristics indicating debris-flow activity in the past are positively correlated with the Melton Ratio and negatively correlated with the channel length susceptible to debris flows. Additionally, a distinct decrease in relief energy of the fans can be observed with increasing percentage of bedrock that is more susceptible to weathering. This may be also connected to variations of flow and deposition behaviour of the different types of weathered sediment. Finally, with increasing fraction of sediment contributing area in the catchment, debris-flow activity tends to increase, whereas the fraction of the different unconsolidated sediment types within the sediment contributing area as well as Average Slope and Relief Ratio show a lower influence on the debris flow occurrence.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
1.1	Problemstellung .....	1
1.2	Zielsetzung und Fragestellungen.....	6
<b>2</b>	<b>Untersuchungsgebiet.....</b>	<b>8</b>
2.1	Geographie des Pitztals.....	8
2.2	Ausgewählte Einzugsgebiete.....	10
2.3	Klima .....	11
2.4	Geologie .....	12
2.5	Geomorphologie .....	18
<b>3</b>	<b>Material und Methoden.....</b>	<b>20</b>
3.1	Datengrundlagen .....	20
3.1.1	Software .....	20
3.1.2	Digitales Geländemodell .....	20
3.1.3	Orthofotos .....	20
3.1.4	Geologische Karten.....	21
3.1.5	Ereignisdaten .....	21
3.1.6	Kegeldaten.....	22
3.1.7	Einzugsgebiete.....	22
3.1.8	Gerinnenetz .....	22
3.2	Geologische Aufnahme .....	23
3.2.1	Kartierung der Festgesteine.....	24
3.2.2	Kartierung der Lockergesteine.....	25
3.2.3	Feldarbeit.....	27
3.3	Einteilung der Festgesteine nach Verwitterungsanfälligkeit.....	29
3.4	Abschätzung der geschieberelevanten Fläche .....	32
3.4.1	Modellierung des Gerinnenetzes.....	32
3.4.2	Berechnung der Sediment Contributing Area (SCA) .....	33
3.5	Erhebung der morphometrischen Daten .....	36
3.6	Erhebung der Ereignis- und Kegeldaten.....	39
3.7	Datenaufbereitung.....	42
3.8	Statistische Analysen.....	43

<b>4</b>	<b>Ergebnisse .....</b>	<b>46</b>
4.1	Erhobene Parameter.....	46
4.1.1	Morphometrische und geologische Merkmale .....	46
4.1.2	Ereignis- und Kegeldaten .....	49
4.2	Untersuchung auf Multikollinearität.....	50
4.3	Vergleich der Geomorphometrie .....	52
4.3.1	Mittlere Neigung.....	52
4.3.2	Melton-Zahl .....	53
4.3.3	Reliefverhältnis .....	54
4.3.4	Länge des murfähigen Gerinnes .....	54
4.4	Vergleich der Geologie.....	56
4.4.1	Anteil der GCM an der Festgesteinsfläche.....	56
4.4.2	Anteil der SCA an der Einzugsgebietsfläche.....	58
4.4.3	Anteile der Lockergesteinstypen an der SCA .....	58
<b>5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>60</b>
5.1	Allgemeines.....	60
5.2	Vergleich der Geomorphometrie .....	61
5.3	Vergleich der Geologie.....	64
5.4	Einteilung nach dem Konzept von Stiny (1931) .....	67
5.5	Datenqualität .....	69
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen und Ausblick .....</b>	<b>70</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>73</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>78</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>80</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>81</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

In den Alpen prägen Muren seit jeher das Landschaftsbild und stellen eine der größten Bedrohungen für die Bevölkerung und Infrastruktur dar. Ihr Auftreten wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, deren Rolle hinsichtlich der Ereignisdisposition bereits in mehreren Studien thematisiert wurde.

Nettleton et al. (2005) unterscheiden zwischen zwei Typen von Faktoren, die für die Entstehung von Muren verantwortlich sind. Die sogenannten vorbereitenden Faktoren tragen zur generellen Anfälligkeit eines Hanges oder Gebietes gegenüber Murereignissen bei, ohne den Prozess selbst auszulösen. Sie schaffen somit die Voraussetzungen, die die Initiierung von Massenbewegungen entweder fördern oder verhindern (Traper 2016). Als Beispiele sind hier neben der lokalen Hangneigung und Topographie, der Vegetationsbedeckung sowie den klimatischen Faktoren die Geologie und die Verwitterungsbedingungen zu nennen. Dem gegenüber stehen die auslösenden Faktoren, wie etwa Starkniederschlag oder Schneeschmelze, welche zur direkten Auslösung eines Murganges führen. Zu erwähnen ist hierbei, dass in den meisten Fällen das Ereignis durch eine Kombination mehrerer vorbereitender und auslösender Faktoren verursacht wird. Die Wechselwirkung dieser Faktoren steuert dabei die Wahrscheinlichkeit und den Zeitpunkt von Ereignissen an verschiedenen Standorten (Nettleton et al. 2005).

Auch Glade und Dikau (2001) berücksichtigen bei der Untersuchung von Muren und gravitativen Massenbewegungen im Allgemeinen diese zwei Gruppen von Faktoren und fügen zusätzlich die sogenannten kontrollierenden Faktoren hinzu, welche den Bewegungsablauf des Prozesses beeinflussen (z.B. Hanggeometrie, Gerinnerauhigkeit).

In ähnlicher Weise beschreibt das Dispositions-konzept von Kienholz (1995) die Anfälligkeit eines Gebietes gegenüber der Entstehung eines Murgangs, wobei zwischen der Grunddisposition und der variablen Disposition unterschieden wird. Unter der Grunddisposition wird die generelle, über einen längeren Zeitraum konstante Anfälligkeit gegenüber dem Auftreten eines Prozesses verstanden. Diese setzt sich aus topographischen und geologischen Faktoren zusammen, wie etwa dem Relief, der lithologischen

Zusammensetzung der Geschiebequellen sowie deren geotechnischen Eigenschaften, welche Auswirkungen auf die Stabilität des Lockermaterials haben und folglich die Verfügbarkeit von Schutt beeinflussen. Die variable Disposition umfasst dagegen Parameter, die zeitlichen Schwankungen unterliegen und somit für Variabilität in der Gesamtdisposition sorgen. Neben hydro-meteorologischen Faktoren (z.B. hydrologische Vorgeschichte) und der Vegetationsentwicklung spielt hier vor allem die Materialverfügbarkeit eine wesentliche Rolle. Das Vorhandensein von ausreichend mobilisierbarem Material bildet die Grundvoraussetzung für einen Murgang. So muss sich gegebenenfalls nach einem Ereignis erst im Laufe der Zeit wieder genügend Schutt durch kontinuierliche Verwitterung bilden, bis es zu einem weiteren Murgang kommen kann. Die variable Disposition weist häufig eine Veränderlichkeit in Form von Zyklen über mehrere Jahre oder saisonalen Schwankungen auf. Erst wenn durch eine kurzfristige Systembelastung (z.B. Niederschlag, intensive Schneeschmelze) der durch die Gesamtdisposition definierte Schwellenwert überschritten wird, kommt es zur Auslösung einer Mure (Kienholz 1995; Zimmermann et al. 1997). In *Abbildung 1* ist dieses Dispositions-konzept schematisch dargestellt.

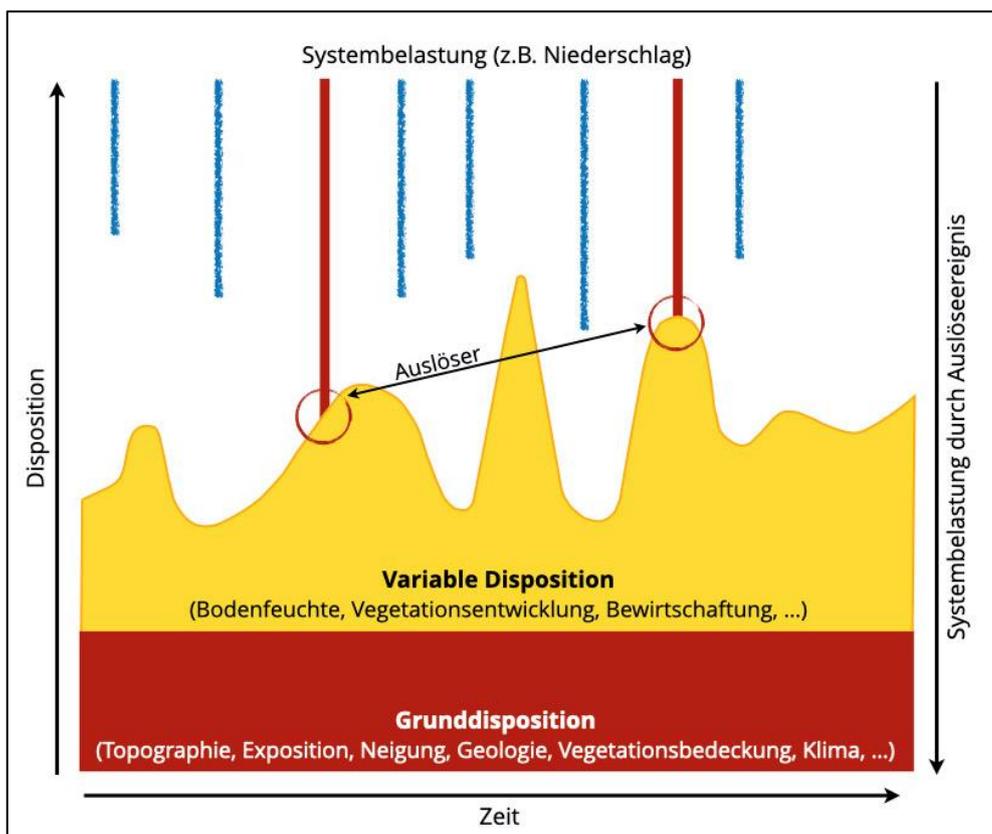


Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Grunddisposition, variabler Disposition und auslösenden Faktoren (Quelle: Hübl 2012, S.18, modifiziert von Stöhr 2020)

Wie anhand der soeben zitierten Fachliteratur ersichtlich wird, nehmen geologische und geomorphologische Parameter (z.B. Lithologie, geotechnische Eigenschaften, Materialverfügbarkeit) sowie morphometrische Merkmale (z.B. Neigung, Einzugsgebietsform) eine grundlegende Rolle bei der Frage über den Einfluss auf die Murgangaktivität in einem Gebiet ein. Verschiedene Studien aus unterschiedlichsten Regionen beschäftigen sich mit der Bedeutung dieser Faktoren im Einzelnen.

Untersuchungen von Wilford et al. (2004) befassen sich mit dem Einfluss morphometrischer Parameter (u.a. Gerinnelänge, Einzugsgebietsfläche, Melton-Zahl) auf das Auftreten verschiedener Prozessarten in British Columbia (Kanada). Jackson et al. (1984) wie auch Marchi und Tecca (1995) untersuchten wiederum den Zusammenhang zwischen Einzugsgebietscharakteristika und der morphologischen Kegelausprägung in den ostitalienischen Alpen bzw. in den kanadischen Rocky Mountains.

Nennenswerte Studien, welche sich mit dem Einfluss der Geologie auf verschiedene Prozesseigenschaften (z.B. Prozessregime, Fließverhalten) von Murgängen befassen, wurden einerseits in den französischen Alpen (siehe Bonnet-Staub 1999), in den italienischen Alpen (Moscariello et al. 2002) sowie im Taiwan (siehe Lin et al. 2000) durchgeführt. Tiranti et al. (2014) beziehen dagegen in ihren Untersuchungen vor allem den Zusammenhang zwischen Lithologie und Ereignisaktivität mit ein. Aufgrund der Relevanz für die vorliegende Masterarbeit wird auf ihre Arbeit im Folgenden näher eingegangen.

Als Grundlage für die Entwicklung eines auf GIS-basierten Frühwarnsystems wurden hierbei insgesamt 2100 Einzugsgebiete in den Westalpen hinsichtlich der Ereignishäufigkeit, der saisonalen Auftretenswahrscheinlichkeit, der Architektur der Ablagerungskegel sowie der Murgang-Rheologie und den damit verbundenen sedimentären Prozessen untersucht. Die Einzugsgebiete wurden zuvor anhand des jeweils dominierenden Festgesteinstyps unter Verwendung des selbst eingeführten „Clay-Weathering-Index“ (CWI) in drei Klassen unterteilt. Dieser qualitative Index beschreibt die Tendenz eines Festgesteines zu Ton oder anderen Feinmineralen mit tonartigem rheologischen Verhalten (tonartige Schichtsilikate) zu verwittern und fasst verschiedene Merkmale bezüglich der Zusammensetzung, der geomechanischen Eigenschaften und der Verwitterung des Grundgesteins zusammen (Tiranti et al. 2014).

Daraus ergibt sich einerseits die Gruppe der Excellent Clay-Maker (ECM), deren Einzugsgebiete mehrheitlich aus Gesteinen mit sehr guter Verwitterungstendenz, wie etwa dünnsschichtigen phyllosilikatischen Metamorphiten oder tonigen Sedimentgesteinen, aufgebaut sind. Die Einzugsgebiete der Gruppe der Bad Clay-Maker (BCM) umfassen dagegen überwiegend Gesteine, die ein schlechtes Verwitterungsvermögen aufweisen. Hierzu zählen vor allem Lithologien mit sehr massivem Auftreten, beispielsweise Granitoide, Gneise, Quarzite oder Ophiolithe. Als dritte Gruppe werden die Einzugsgebiete der Good Clay-Maker (GCM) vorwiegend von Gesteinen vertreten, deren Verwitterungsanfälligkeit zwischen jenen der ECM und BCM liegt (z.B. massive Kalksteine und Dolomite) (Tiranti et al. 2014).

Die Ermittlung der Ereignishäufigkeit und der saisonalen Auftretenswahrscheinlichkeit von Muren erfolgte mittels Dokumentationen historischer Ereignisse und brachte für die drei Einzugsgebietsklassen folgende Erkenntnisse, die auch in *Tabelle 1* zusammengefasst sind (Tiranti et al. 2014):

**ECM-Einzugsgebiete:** Die Gesteine sind aufgrund ihrer strukturellen Schwäche besonders anfällig gegenüber physikalischen Einwirkungen und bewirken eine sehr frequente Auslösung von Muren (2 Ereignisse/Jahr), die hauptsächlich im Frühling, Sommer und Herbst auftreten. Grund dafür ist die große Menge an produziertem Lockermaterial entlang des Gerinnenetzes, welches zudem aufgrund des hohen Feinanteils schon bei niedrigen Niederschlagsintensitäten mobilisiert werden kann (Tiranti et al. 2014).

**GCM-Einzugsgebiete:** Da die Gesteine im Vergleich zu den ECM weniger zersetzbar sind, ist weniger unkonsolidiertes Material vorhanden. Dementsprechend zeigen diese Einzugsgebiete eine geringere Ereignishäufigkeit, wobei das stärkste Auftreten von Muren im späten Frühling stattfindet (Tiranti et al. 2014).

**BCM-Einzugsgebiete:** Im Vergleich zu den beiden anderen Gruppen weisen diese Gesteine eine höhere Beständigkeit gegenüber der Zersetzung auf und bilden vor allem grobes Lockermaterial (z.B. Blöcke in siltig-sandiger Matrix), das nur bei sehr intensiven Niederschlägen in Bewegung gebracht wird. Die mittlere Wiederkehrdauer der Ereignisse beträgt demnach etwa 20 Jahre, bei einem Hauptauftreten im Herbst und Frühling, wenn die Niederschläge sehr großflächig, dauerhaft und oft extrem sind (Tiranti et al. 2014).

Tabelle 1: Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen von Tiranti et al. (2014) (Quelle: nach Tiranti et al. 2014, S.101)

CWI-Klasse	Mittlere Wiederkehrdauer [Jahre]	Minimaler auslösender Niederschlagstyp	Hauptauftreten (Jahreszeit)
ECM	2	Mittlere Intensität ( $\geq 20$ mm/h)	Sommer
GCM	5	Hohe Intensität ( $\geq 30$ mm/h)	Spätfrühling
BCM	20	Sehr hohe Intensität ( $\geq 50$ mm/h)	Herbst, Frühling

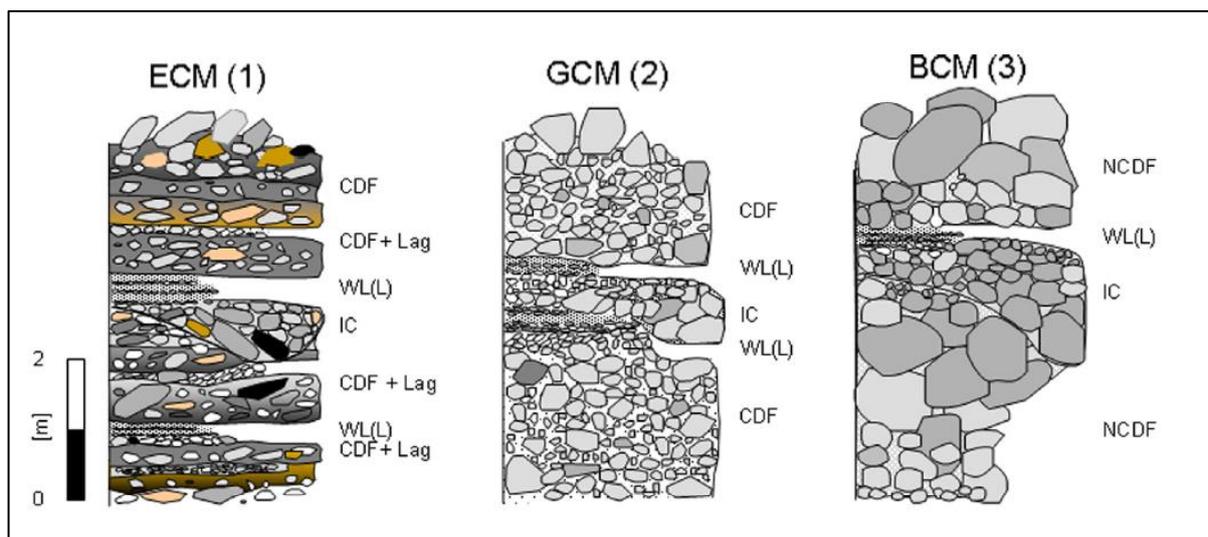


Abbildung 2: Schematische Darstellung der stratigraphischen Profile von Murablagerungen in den drei CWI-Klassen (Quelle: MoscarIELlo et. al 2002, S.145, modifiziert von Tiranti et al. 2014)

Neben den genannten Studien liegen allerdings speziell für den österreichischen Alpenraum kaum Untersuchungen vor, die den Einfluss der Geologie und der Geomorphometrie auf das Murganggeschehen in kombinierter Weise betrachten. Zudem werden in nur wenigen Arbeiten Parameter berücksichtigt, welche etwa die Art des vorhandenen Lockergesteins, die Materialverfügbarkeit oder die Gerinnemorphologie beschreiben, da eine genaue Erfassung dieser oft schwierig ist. Dank hochauflösender Fernerkundungsdaten (digitale Geländemodelle, Orthofotos) in Kombination mit geografischen Informationssystemen ergibt sich in diesem Zusammenhang mittlerweile eine Vielzahl neuer Möglichkeiten.

## 1.2 Zielsetzung und Fragestellungen

Basierend auf der angeführten Problemstellung ist das Ziel dieser Arbeit, den Einfluss der Geologie sowie der Einzugsgebiets- und Gerinnemorphometrie auf die Murgangaktivität in ausgewählten Einzugsgebieten im Pitztal (Tirol) zu untersuchen. Eine Kartierung bzw. Digitalisierung der Fest- und Lockergesteinsflächen im Untersuchungsgebiet unter Verwendung eines geographischen Informationssystems (GIS) soll dabei als Grundlage für die Untersuchungen dienen. Die Signifikanz und Stärke der untersuchten Abhängigkeiten soll letztendlich mittels statistischer Korrelationsanalysen geprüft werden.

In einer ersten Fragestellung (1a) sollen Zusammenhänge zwischen der Ereignishäufigkeit und ausgewählten morphometrischen Einzugsgebiets- und Gerinnefaktoren (mittlere Neigung, Melton-Zahl, Reliefverhältnis, Länge des murfähigen Gerinnes) analysiert werden. Anschließend soll die Ereignishäufigkeit in den Einzugsgebieten einerseits in Abhängigkeit des Anteils zweier Festgesteinsklassen, deren Unterscheidung auf der unterschiedlichen Verwitterungsanfälligkeit der Lithologien beruht (Fragestellung 1b), andererseits in Bezug auf die Größe des geschieberelevanten Lockergesteinsvorkommen verglichen werden (Fragestellung 1c). Zudem sollen die Anteile verschiedener Lockergesteinstypen berücksichtigt werden (Fragestellung 1d).

Für die Ereignishäufigkeit sollen historische Daten aus der Ereignisdokumentation sowie morphometrische Merkmale der Ablagerungskegel aller Einzugsgebiete (mittlere Kegelneigung, Kegelfläche, Melton-Zahl des Kegels) herangezogen werden, wobei anhand zweiterer zumindest eine Tendenz in der Murgangaktivität abgeschätzt werden kann.

Eine abschließende Fragestellung (2) bezieht sich auf das Konzept von Stiny (1931), welches je nach Verhältnis des Lockermaterials zum Gerinne zwischen Altschutt- und Jungschuttwildbach unterscheidet. Altschuttwildbäche sind demnach Bäche, deren Geschiebeherde nicht mehr an Massenzuwachs erfahren und älter als die gegenwärtige Bachtätigkeit sind (z.B. glaziale Ablagerungen, fossiler Hangschutt). Im Gegensatz dazu werden Jungschuttwildbäche von Lockergesteinsherden gespeist, die aufgrund kontinuierlicher Verwitterungsvorgänge ständig neu produziert werden (z.B. Verwitterungsschutt). Jungschuttwildbäche sind laut Stiny (1931) häufig durch längere ereignislose Zeiträume (bis zu 35 Jahre) gekennzeichnet, bis sich schließlich genügend Geschiebe gebildet hat und der Bach sich erneut „schnäuzen“ muss.

Konkret sollen in der vorliegenden Arbeit folgende Fragestellungen behandelt werden:

1. Welche Unterschiede zeigen die untersuchten Einzugsgebiete in der Ereignisfrequenz in Abhängigkeit
  - a) der morphometrischen Parameter Mittlere Neigung, Melton-Zahl, Reliefverhältnis und Länge des murfähigen Gerinnes?
  - b) des Vorkommens an verwitterungsanfälligeren (GCM) bzw. verwitterungsresistenteren (BCM) Festgesteinen in den Einzugsgebieten? (Vergleich mit Tiranti et al. 2014)
  - c) des Anteils der ermittelten geschieberelevanten Fläche (= sediment contributing area) an der Einzugsgebietsfläche?
  - d) der Anteile der Lockergesteinstypen (Hangschutt, Moräne, Blockgletscher, fluviatile/fluvioglaziale Sedimente) an der geschieberelevanten Fläche des Einzugsgebietes?
2. Lassen sich anhand der erhobenen Daten die Einzugsgebiete in Altschutt- und Jungschuttwildbäche gemäß dem Konzept von Stiny (1931) unterteilen?

## 2 Untersuchungsgebiet

Gegenstand der Untersuchungen sind 23 Einzugsgebiete im Pitztal, dessen geografische, geologische und klimatische Eigenschaften nachstehend näher beschrieben werden. Eine Beschreibung der ausgewählten Einzugsgebiete erfolgt in Kapitel 2.2.

### 2.1 Geographie des Pitztals

Das etwa 40 km lange, Nord-Süd verlaufende Pitztal befindet sich im südwestlichen Teil des österreichischen Bundeslandes Tirol im Bezirk Imst (siehe *Abbildung 3*). Es stellt ein südliches Seitental des Inntals dar und zählt zu den Öztaler Alpen, die als Teil der Zentralen Ostalpen eine der größten Gebirgsgruppen der gesamten Ostalpen ausmachen. Westlich wird das Pitztal vom Kautertal, östlich vom fast parallel verlaufenden Ötztal begrenzt (Land Tirol o. J.; Tourismusverband Pitztal 2018). Insgesamt umschließen mehr als 50 Dreitausender das Pitztal, wobei die Wildspitze (3772 m) als höchster Berg Tirols den größten Bekanntheitsgrad einnimmt (Tourismusverband Pitztal 2018).

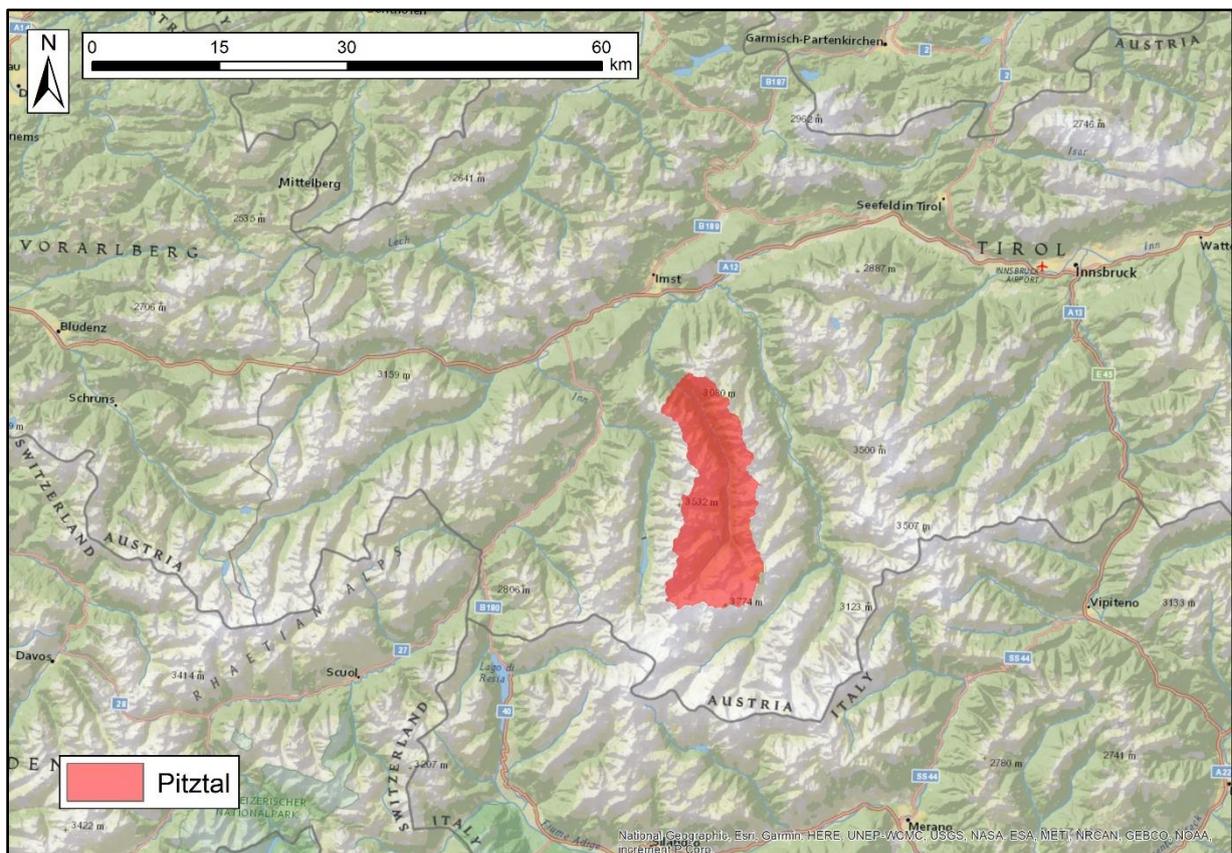


Abbildung 3: Lage des Pitztals im Bundesland Tirol

Durchflossen wird das Tal von der Pitze, die ihren Ausgang auf der Nordseite der Wildspitze am Mittelbergferner nimmt und nach einem schluchtartigen Unterlauf südlich von Imst in den Inn mündet (auf ca. 720 m Seehöhe) (Tourismusverband Pitztal 2018). Insgesamt entwässert die Pitze ein Einzugsgebiet von etwa 308 km<sup>2</sup> und überwindet einen Höhenunterschied von ca. 1700 m (Land Tirol 2020c). Während der äußere Abschnitt mit den Gemeinden Arzl und Wenns aufgrund der ausgeprägten, beidseitig besiedelten Talterrassen Mittelgebirgscharakter aufweist und gegen das Inntal hin offen erscheint, kommt es von der Gemeinde Jerzens südwärts zu einer Verengung des Pitztals. Dieser innere Talabschnitt ist gekennzeichnet durch einen schmalen und ebenen Talboden, der von steilen Hängen und Gräben umgeben wird, welche für die hohe Anfälligkeit gegenüber Naturgefahren in diesem Abschnitt verantwortlich sind. Gegen den Talschluss hin, südlich der Gemeinde St. Leonhard, gabelt sich das Tal in das Mittelberg- und Taschachtal, die in ein ausgeprägtes Gletschergebiet führen (Land Tirol o. J.; Tourismusverband Pitztal 2018).

Bedingt durch den engen Talquerschnitt erfolgt die Besiedelung im inneren Talabschnitt hauptsächlich in Form von Einzelhöfen und Weilern (Tirol Atlas o. J.). Landwirtschaft spielt als Erwerbstätigkeit aufgrund des größtenteils steilen Geländes nur im vorderen Pitztal eine bedeutende Rolle, wohingegen der Tourismus, vor allem dank der Schigebiete am Talschluss (Pitztaler Gletscher, Riffelsee) die wesentliche Einnahmequelle bildet (Land Tirol o. J.).

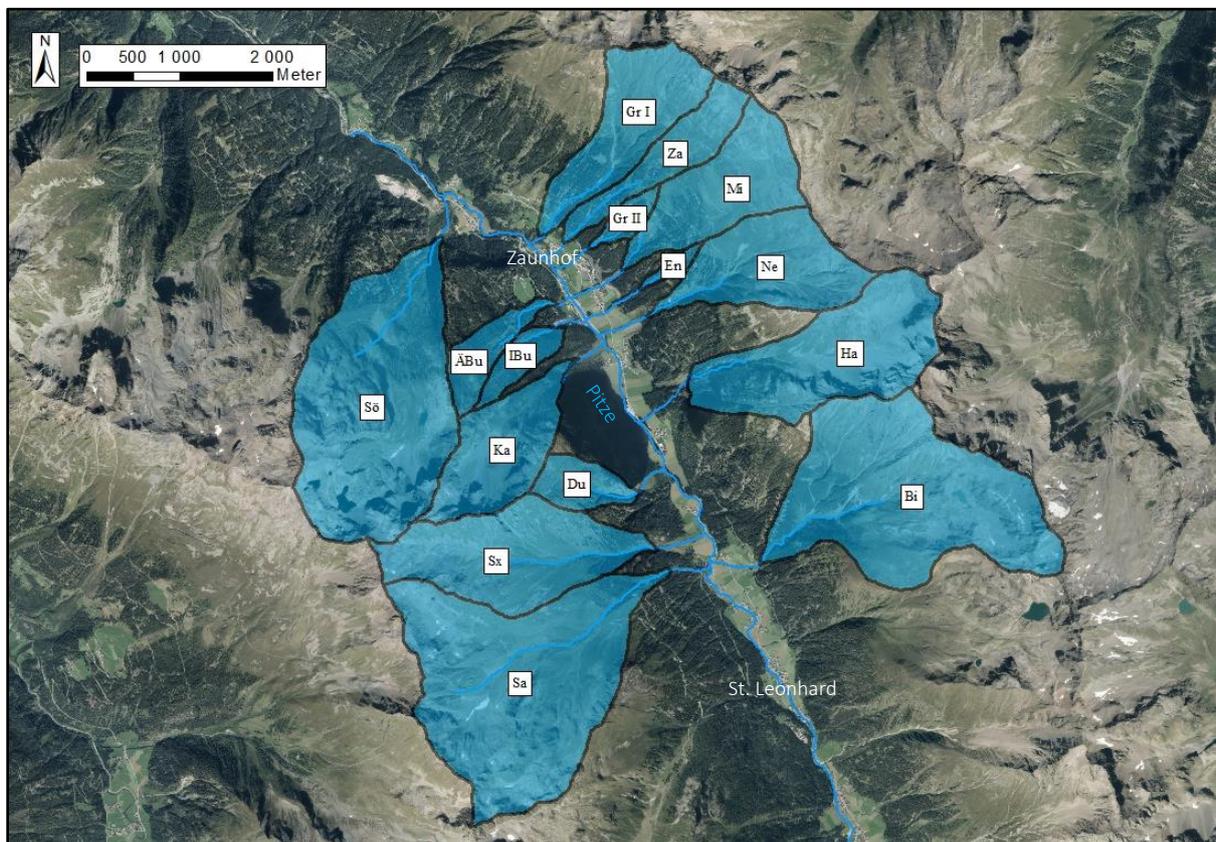
## 2.2 Ausgewählte Einzugsgebiete

Von den insgesamt 23 ausgewählten Teileinzugsgebieten liegen 15 im vorderen Pitztal sowie 8 weiter südlich im hinteren Talabschnitt. *Tabelle 2* enthält alle untersuchten Einzugsgebiete, in *Abbildung 4* und *Abbildung 5* ist deren Lage dargestellt.

*Tabelle 2: Ausgewählte Einzugsgebiete mit Kürzel und Flächenangabe.*

*Grün hinterlegt: Einzugsgebiete im vorderen Tal; blau hinterlegt: Einzugsgebiete im hinteren Tal*

Einzugsgebiet	Kürzel	Fläche [km <sup>2</sup> ]	Einzugsgebiet	Kürzel	Fläche [km <sup>2</sup> ]
Äußerer Burgbach	ÄBu	0,51	Saxuierbach	Sx	2,25
Bichlbach	Bi	4,17	Söllbergbach	Sö	4,28
Dunkelrinnerbach	Du	0,47	Zaunhoferbach	Za	0,88
Enzenstallermurbach	En	0,10	Hundsbach	Hu	4,51
Grünbach I	Gr I	1,55	Kitzelesbach	Ki	4,06
Grünbach II	Gr II	0,21	Leibach	Le	4,45
Hairlachbach	Ha	2,46	Lussbach	Lu	9,56
Innerer Burgbach	IBu	0,35	Morlebach	Mo	2,81
Karbach	Ka	1,39	Perlekarbach	Pe	0,47
Mitterbach	Mi	1,55	Reiselebach	Re	0,69
Neschelbach	Ne	1,63	Wassertalbach	Wa	1,98
Sagebach	Sa	4,58			



*Abbildung 4: Lage der untersuchten Einzugsgebiete im vorderen, nördlichen Pitztal*

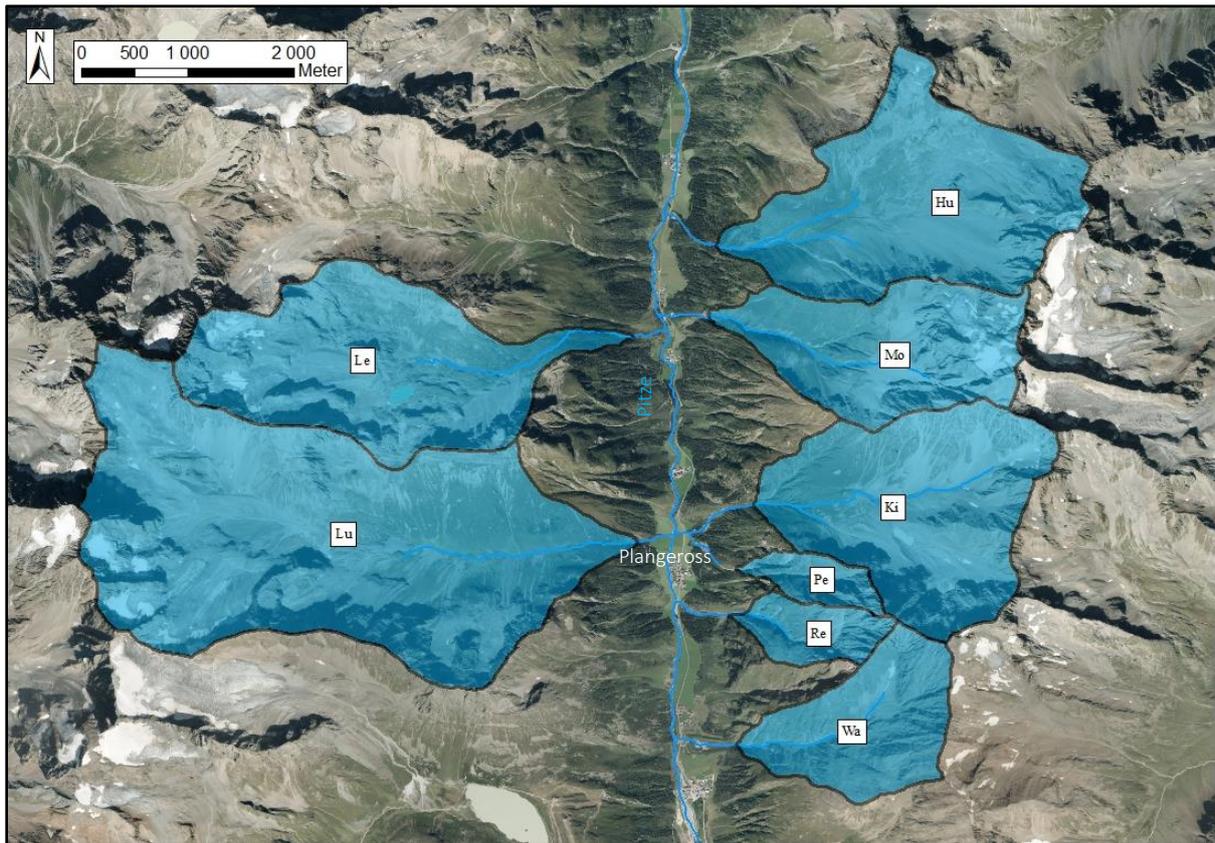


Abbildung 5: Lage der untersuchten Einzugsgebiete im hinteren, südlichen Pitztal

Die südlichen Einzugsgebiete weisen einen annähernd West-Ost-gerichteten Talverlauf auf, die vorderen Täler verlaufen vermehrt in Nordost-Südwest-Richtung. Die mittlere Einzugsgebietsgröße beträgt 2,4 km<sup>2</sup>. Der Lussbach stellt mit einer Fläche von 9,6 km<sup>2</sup> das größte Einzugsgebiet dar, der Enzenstallermurbach mit 0,1 km<sup>2</sup> das kleinste. Die in *Tabelle 2* verwendeten Kürzel der Einzugsgebietsnamen werden nachfolgend für die gesamte Arbeit übernommen.

### 2.3 Klima

Aufgrund seiner inneralpiner Lage ist das Pitztal durch ein kontinentales Gebirgsinnenklima geprägt, welches die Gegend zu einer der trockensten im österreichischen Alpenraum macht. Die allseitige Abschirmung durch mehrfach gestaffelte, hohe Gebirgskämme bewirkt geringe Niederschlagssummen, wobei vor allem die Nördlichen Kalkalpen als Hindernis für die vom Nordwesten kommenden atlantischen Luftmassen eine Rolle spielen. Eine verstärkte Ein- und Ausstrahlung infolge der geringen mittleren Bewölkung ruft starke jahres- und tageszeitliche Temperaturschwankungen hervor, wie die mittleren Jahresschwankungen von 18-21 °C in den Tieflagen und 16 °C in der subalpiner Höhenstufe verdeutlichen (Kilian et al. 1994).

Nach Kilian et al. (1994) liegen die Jahresniederschlagssummen in den tief- bis mittelmontanen Tallagen zwischen 600 und 800 mm, in den subalpinen Lagen zwischen 900 bis knapp über 1000 mm. „Das Niederschlagsmaximum wird im Juli erreicht, seltener im August. Ein sekundäres winterliches Niederschlagsmaximum ist nur schwach ausgebildet“ (Kilian et al. 1994, S. 16). Laut der eHYD-Karte „Mittlerer Jahresniederschlag“, welche den mittleren Jahresniederschlag für den Zeitraum 1981-2010 an Gitterpunkten eines ca. 6 x 6 km Rasters abbildet, ergibt sich für das vorderste Pitztal im Bereich um die Gemeinde Arzl ein Wert von 794 mm, während für den Talschluss (Bereich um Mandarfen) ein Jahresmittel von 985 mm angegeben wird. Der mittlere Jahresniederschlag für den inneren Talabschnitt um das Gemeindezentrum von St. Leonhard beläuft sich dagegen auf 1060 mm (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2020a). In denselben Gitterpunkten beträgt der Bemessungsniederschlag eines 100-jährliches Ereignisses bei einer Dauer von 60 Minuten 45,9 mm im vorderen Pitztal, 44,2 mm im Talschluss sowie 48,0 mm im Bereich um St. Leonhard (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2020b).

### 2.4 Geologie

Hinsichtlich der Geologie liegt das Pitztal im nördlichen Bereich des „Öztal-Stubai-Komplexes“ (veraltet auch „Ötztalkristallin“), einer allochthonen Kristallinscholle, die als Teil des ostalpinen Deckensystems das Penninikum während der alpidischen Orogenese überfuhr. Bei einer Fläche von ca. 70 x 70 km wird diese geologische Einheit im Norden von den Nördlichen Kalkalpen, im Westen vom verwandten Silvretta-Kristallin des Engadiner Fensters, im Osten vom Tauernfenster und den Innsbrucker Quarzphylliten sowie südlich von der Zone der Alten Gneise und dem Schneeberg-Komplex begrenzt (siehe *Abbildung 6*) (Krainer 2010; Rode 2008; RWTH Aachen 2011).

Die Gesteine des Öztal-Stubai-Komplexes können nach Krainer (2010) in folgende drei Gruppen zusammengefasst werden:

- a) „Altkristallin“ (= metamorphes Grundgebirge)
- b) Brenner Mesozoikum (= metamorph überprägte mesozoische Sedimente)
- c) Ganggesteine

Das Brenner Mesozoikum stellt eine Abfolge metamorph überprägter mesozoischer Sedimentgesteine entlang der Brennerfurche am Ostrand der Ötztal-Stubai-Masse (Gebiet um Kalkkögel, Serlesgruppe und Tribulaun) dar. Die bis zu 1200 m mächtige Schichtfolge, welche in diesem Bereich das Altkristallin überlagert, setzt sich etwa aus quarzitischen Gesteinen der unteren Trias sowie aus triassischen und jurassischen Kalk- und Dolomitmarmoren zusammen (Krainer 2010; RWTH Aachen 2011). Bei den Ganggesteinen handelt es sich um basaltische bis andesitische Gänge mit einer Mächtigkeit von bis zu 10 m, die das Altkristallin durchziehen, das Brenner Mesozoikum jedoch nicht durchkreuzen (Krainer 2010).

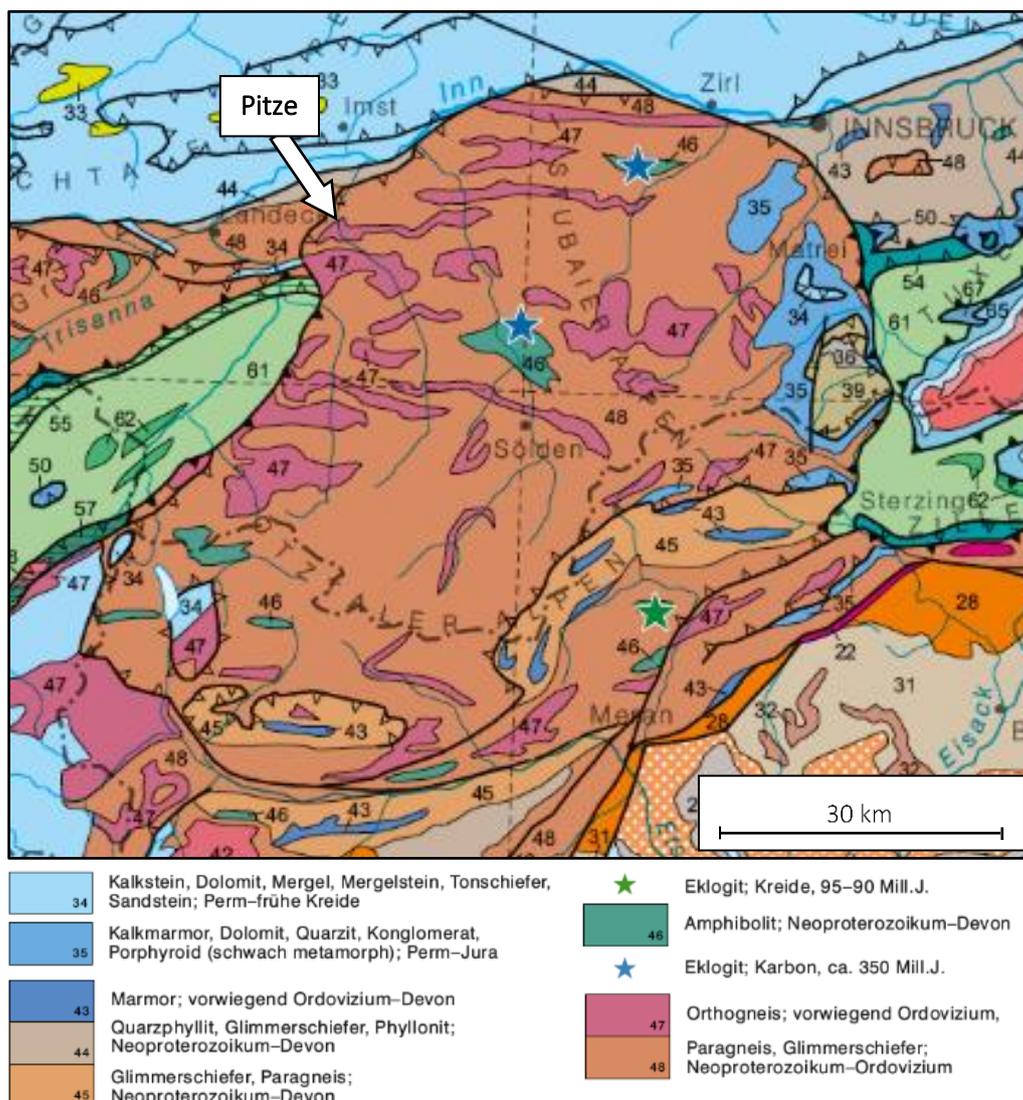


Abbildung 6: Geologische Übersicht des Ötztal-Stubai-Komplexes. Das Pitztal befindet sich am nordwestlichen Rand (Quelle: Geologische Bundesanstalt 2015, verändert)

Da das Pitztal zur Gänze aus den Lithologien des Altkristallins aufgebaut ist und deren geologische Eigenschaften für die gegenständlichen Untersuchungen von Bedeutung sind, soll auf diese im Folgenden detaillierter eingegangen werden.

Das kristalline Grundgebirge setzt sich vorwiegend aus Paragneisen und mineralreichen Glimmerschiefern zusammen, lokal im Verband treten Orthogneise, Amphibolite sowie seltener Eklogite, Migmatite und Peridotite auf. Aus tektonischer Sicht findet man im Bereich des Pitztals einen Großfaltenbau aus horizontal einfallenden Faltenachsen mit einem Streichen in annähernd Ost-West-Richtung vor (Krainer 2010; Rode 2008; RWTH Aachen 2011).

Bei den Paragneisen des Pitztals handelt es sich um Biotit-Plagioklasgneise (Schiefergneise) und Gneisglimmerschiefer, die durch die polymetamorphe Überprägung ehemaliger Grauwackenserien bzw. toniger und sandiger Ablagerungen entstanden sind. Sie treten im gesamten Tal zu Tage, dominieren aber vor allem im hintersten Talabschnitt, etwa südlich des Weilers Mandarfen, und im mittleren Bereich zwischen dem Gemeindezentrum St. Leonhards und dem Weiler Bichl (Einzugsgebiet Bichlbach). Quarz und Glimmer sind stets reichlich enthalten, während der Gehalt an Feldspat variiert. Bei hohen Glimmergehalten ist neben Biotit

auch zunehmend Muskovit vorhanden (Biotit-Muskovit-Plagioklasgneis). Des Weiteren kann Granat eingelagert sein, seltener auch Staurolith. Die Paragneise fallen durch ihre rostrote bis braune Verwitterungsfarbe auf. Die genaue Unterscheidung zwischen Gneis und Glimmerschiefer ist aufgrund des oft unscharfen Übergangs von gneisigem zu schiefrigem Gefüge der Gesteine nicht immer möglich (Hammer 1929; Purtscheller 1978).



*Abbildung 7: Handstück eines Zweiglimmerigen Schiefergneises (Biotit-Muskovit-Plagioklasgneis) im Einzugsgebiet Kitzelesbach (Blick auf die Schieferungsebene). Auffallend ist die rot-braune Verwitterungsfarbe.*

Im Bereich der Ortschaft Plangeross im hinteren Talabschnitt zieht sich ein west-ost-verlaufender, etwa 1 km breiter Verband von Feinkörnigen Biotitschiefern durch die Einzugsgebiete des Kitzelesbachs und Lussbachs (siehe *Abbildung 8*). Die dünnplattigen braunen Gesteine sind Abkömmlinge ehemaliger Tonschiefer. Der in großer Menge

auftretende Biotit regelt sich schuppenartig an den Schieferungsflächen ein, im Querbruch findet man das feinkörnige Quarz-Feldspat-Gemenge vor (Hammer 1929).



Abbildung 8: Feinkörniger Biotitschiefer mit dünnplattiger Schichtung (Lagen im mm- bis cm-Bereich) im Einzugsgebiet Kitzelesbach. Der Aufschluss im rechten Bild zeigt eine besonders feine Ausprägung der Schieferungsflächen.

Im vorderen Talabschnitt sowie im Gebiet nördlich der Talgabelung beherrschen auf beiden Talseiten Vorkommen verschiedener Orthogneise den geologischen Aufbau (siehe *Abbildung 9*). Diese sind durch die Intrusion zahlreicher granitischer Schmelzflüsse in das damals vorhandene Kristallingestein und anschließende metamorphe Umwandlung entstanden. Den Hauptanteil bilden, gereiht nach steigendem  $\text{SiO}_2$ - und Alkaliengehalt, Biotitgranitgneise, Biotitaugengneise und Zweiglimmerige Augen- und Flasergneise, vereinzelt treten Tonalitgneise, Muskovitgranitgneise und Aplite auf. Die Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung sind auf ursprüngliche Spaltungen des Magmas zurückzuführen. Vereinzelt spielte auch die Einschmelzung von durchbrochenem Gestein eine Rolle (Hammer 1929).

In den Biotitgranitgneisen, den stärksten basischen Vertretern, überwiegt noch der Plagioklas (Albit bis Oligoklas) gegenüber dem Kalifeldspat. Als einzig mafisches Mineral ist Biotit, seltener auch Hornblende enthalten. Das Gefüge dieser grob- bis feinkörnigen Gneise geht des Öfteren in eine flaserige oder lagenförmig schiefrige Ausbildung über. Die Biotitaugengneise zeigen sich wiederum ausgeprägt schiefrig, wobei die eingesprengten, parallel angeordneten Feldspäte abgerundet und ausgeschwänzt erscheinen, während der Biotit größere Flasern bildet. Im Bereich der Hohen Geige weist der grobkörnige Biotitaugengneis zum Teil chloritisierten Biotit auf (Hammer 1929). Der ebenfalls im Untersuchungsgebiet vorkommende Tonalitgneis

entwickelte sich aus einem im Vergleich zum Granit stärker basischeren Ausgangsgestein mit einem Kalifeldspat-Anteil kleiner als 10 Vol.-% (=Tonalit) (Okrusch und Matthes 2014). Kennzeichnend für die Gruppe der Zweiglimmerigen Augen- und Flasergneise ist der hohe Anteil an Kalifeldspat, in erster Linie Mikroklin, bei gleichzeitig hohem Quarzgehalt. Bei den Glimmern überwiegt Muskovit gegenüber Biotit. Die Struktur dieser hauptsächlich grobkörnigen Gneise erweist sich häufig als flaserig und von Augenbildung geprägt, was auf eine generell starke Durchbewegung der Gesteine hindeutet (Hammer 1929).

Muskovitgranitgneise und Aplite stellen die sauersten Vertreter der im Pitztal vorkommenden Orthogneise dar und treten, häufig als Randfazies der anderen Granitgneise, in Form von kleineren Lagern und Gängen auf. Während die Muskovitgranitgneise als weiße, grobkörnige Gesteine mit gleichmäßiger, paralleler Einregelung von Muskovitschuppen beschrieben werden können, handelt es sich bei den Apliten um glimmerarme bis glimmerfreie, weiße granitische Ganggesteine mit meist fehlender Schieferung (Hammer 1929).



Die Gegend um den „Talknick“ im mittleren Pitztal wird von einem aus verschiedenen Gesteinsserien zusammengesetzten Amphibolitzug beherrscht, der sich in östliche Richtung bis ins benachbarte Ötztal fortsetzt. Orographisch rechts tritt hier die sogenannte Wechselserie auf, die sich durch die regelmäßige Wechsellagerung von Amphibolit mit verschiedenen Paragneisen kennzeichnet. Epidot sorgt dabei für eine grünliche Färbung des Amphibolits und lagert sich teilweise in Lagen oder in Form von Knollen in diesen ein. Der Gehalt an Biotit und Granat im Amphibolit ist verhältnismäßig gering. Im Gipfelbereich der Hohen Geige liegt ein Teil dieser Wechselserie in migmatitischer Form vor, demzufolge erscheint die charakteristische Wechsellagerung hier stark verwischt. Westlich der Pitze setzt sich der Amphibolitzug, ebenso wie weitere Vorkommen im vorderen Pitztal in der Gegend um Zaunhof, überwiegend aus Plagioklas-Amphibolit zusammen, der stellenweise durch Hornblendegneis bzw. Hornblendeschiefer ersetzt ist und zum Teil Granat führt (Hoernes und Hoffer 1973).

Im Pitztal treten darüber hinaus einzelne Quarzitlager zu Tage, beispielsweise im Einzugsgebiet des Lussbachs (westlich von Plangeross). Diese grauen Quarzite können in den meisten Fällen als feinkörnig, dickbankig und glimmerarm charakterisiert werden (Hammer 1929).

Eine Besonderheit stellt im Altkristallin die metamorphe Entwicklung dar. „Während die meisten Einheiten der Alpen vor allem alpidisch geprägt sind, wurde das Ötztalkristallin zum Teil deutlich verschont und liefert somit viele Erkenntnisse der präalpidische [*sic*] Entwicklung“ (Rode 2008, S. 3). Im Rahmen der Kaledonischen Metamorphose vor 430-490 Millionen Jahren erfuhren die Paragneise eine erste hochtemperierte Überprägung entsprechend der Amphibolit- bis unteren Granulitfazies. Die Hauptüberprägung der altkristallinen Gesteine erfolgte im Zuge der variszischen Metamorphose (390-270 Ma), die von einer anfänglichen Hochdruck-Phase in Eklogitfazies allmählich in eine amphibolitfazielle Phase überging, in der es infolge der Druckabnahme zur Umwandlung der zuvor gebildeten Eklogite in Amphibolite kam. Die abschließende alpidische Metamorphose (73-100 Ma) charakterisiert eine Zunahme des Metamorphosegrades von Nordwesten (untere Grünschieferfazies) nach Südosten (Amphibolit- bis Eklogitfazies) (Krainer 2010; Rode 2008; RWTH Aachen 2011).

## 2.5 Geomorphologie

In der morphologischen Gestaltung des Pitztals und der Alpen im Allgemeinen spielten vor allem die quartären Vereisungsphasen, die ihren letzten Höhepunkt vor etwa 20.000 Jahren erreichten, eine wesentliche Rolle. Die schürfende Wirkung der ausgedehnten Gletschermassen führte zu einer Umformung der ursprünglichen Kerbtäler zu Trogtälern mit flachem Talboden und steilen Trogwänden. Große Mengen an Schutt unterschiedlichster Korngrößen wurden von den Gletschern aus deren Nährgebiet talabwärts transportiert und lagerten sich in Form von Seiten-, Grund- und Endmoränen an den Rändern, der Basis und der Gletscherstirn ab. Das Moränenmaterial ist meistens ungeschichtet sowie schlecht sortiert, Grundmoränen weisen zudem einen hohen Feinanteil auf. Zahlreiche Moränenwälle dokumentierten heute die über die Zeit variierenden Gletscherstadien. Des Weiteren stellen Rundhöcker, Gletscherschliffe wie auch die vielen Kare und ihre infolge des Gletscherrückgangs gebildeten Karseen Belege für die vergangene Eiserosion dar (Krainer 2010).

Die einzelnen Seitentäler des Pitztals wurden nicht alle gleich stark von der eiszeitlichen Überprägung erfasst. Während größere Einzugsgebiete, die sich infolge intensiverer Glazialerosion ähnlich dem Haupttal U-förmig eingetieft haben meist größere Moränenablagerungen aufweisen und aufgrund einer am Talausgang geformten Steilstufe oft als Hängetäler bezeichnet werden können, zeigen kleinere, weniger vergletscherte Seitentäler häufig einen geringeren Moränenanteil und einen talabwärts mehr oder weniger gleichbleibenden Kerbtalcharakter.

Durch die mit dem Rückgang der Gletschermassen verbundenen Freilegung der steilen Talflanken verringerte sich deren Stabilität, was bis heute die Anfälligkeit gegenüber Steinschlag, Bergstürze und Rutschungen erhöht, welche wiederum direkt oder indirekt zu Murenbildungen führen können (Krainer 2010).

Mit Stand 1969 sind die Öztaler Alpen mit insgesamt 213 Gletscher auf einer Fläche von ca. 170 km<sup>2</sup>, was etwa 32% der Gesamtfläche der Öztaler Alpen entspricht, die am stärksten vergletscherte Gebirgsgruppe Österreichs (Hasslacher und Lanegger 1988). Bis 2010 hat sich diese Fläche um ca. 17% reduziert (Krainer 2010).

Als weitere wesentliche morphologische Erscheinungsformen im Untersuchungsgebiet sind die Blockgletscher zu nennen, von denen in den gesamten Öztaler und Stubai Alpen insgesamt 1200 erfasst sind (Krainer und Ribis 2011). Hierbei handelt es sich um „lappen- bis zungenförmige Körper aus gefrorenem Lockermaterial (Hangschutt, Moräne) und Eislinen oder Eiskörpern, die sich deutlich von ihrer Umgebung abheben und sich langsam hangabwärts bewegen“ (Krainer und Ribis 2011, S. 68).

Blockgletscher bilden sich einerseits durch das Gefrieren von Hang- und Verwitterungsschutt, andererseits entstehen sie infolge des Abschmelzens schuttbedeckter Kargletscher. Unterschieden wird zwischen aktiven Blockgletschern, die einen Eiskern besitzen und in Bewegung sind (siehe *Abbildung 10*), passiven Blockgletschern, die noch vereist sind, aber bereits zum Stillstand gekommen sind sowie den bereits eisfreien fossilen Blockgletschern. Bei den meisten aktiven Formen besteht die äußere ungefrorene, bis zu einigen Metern mächtige Schuttlage an der Oberfläche aus einer grobkörnigen Lage (Korngröße im dm-Bereich), an die unterhalb ein mehr feinkörniger Horizont anschließt. Bei Fließgeschwindigkeiten von wenigen Dezimetern bis einigen Metern pro Jahr erreichen Blockgletscher oft Längen von mehreren hundert Metern sowie Breiten von 100 bis 200 m (Krainer und Ribis 2011).



*Abbildung 10: Aktiver Blockgletscher im Einzugsgebiet Kitzelesbach*

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Datengrundlagen

Nachstehend werden die Daten und Materialien, die im Rahmen der Arbeit verwendet wurden, näher erläutert.

#### 3.1.1 *Software*

Die digitale Erfassung und Bearbeitung aller räumlichen Daten und Geländeinformationen als Grundlage für die statistische Auswertung erfolgte in einem Geographischen Informationssystem. Verwendet wurde das Programm „ArcGIS Desktop“ (Version 10.7.1, Firma ESRI) mit der Erweiterung „Spatial Analyst“. Dargestellt werden die Daten im geographischen Koordinatensystem „MGI Austria Lambert“ (EPSG:31287), einer winkeltreuen Kegelprojektion. Für die Aufbereitung der erhobenen Daten sowie die Darstellung der Ergebnisse in Form von Tabellen und Diagrammen kam das Programm „Microsoft Excel“ zum Einsatz. Die statistischen Analysen wurden in der Software „R“ (Version 4.0.4) durchgeführt.

#### 3.1.2 *Digitales Geländemodell*

Das digitale Geländemodell deckt das gesamte Pitztal ab und wurde vom Institut für Alpine Naturgefahren (Boku Wien) als Raster-Datei zu Verfügung gestellt. Es weist eine Auflösung von 1 x 1 m auf und stammt aus dem Jahr 2006.

#### 3.1.3 *Orthofotos*

Die verwendeten Orthofotos stammen vom Land Tirol und stehen als Datensatz im „Open Data Österreich“-Portal (data.gv.at) unter <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/35691b6c-9ed7-4517-b4b3-688b0569729a> zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um eine Sammlung aktueller und historischer Aufnahmen (seit 1940), welche zum Teil verschiedene Bereiche von Tirol abdecken. Für das Untersuchungsgebiet im Pitztal sind aktuelle Fotos mit einer Bodenauflösung von 20 cm aus den Befliegungsjahren 2018 und 2015 vorhanden, zusätzlich können Luftbilder von 2010, 2009, 2005, 2003, 2001 sowie aus dem Zeitraum 1970-1974 abgerufen werden. Der Datensatz wurde über den WMS-Dienst (Web Map Service) ins ArcGIS eingebunden (Land Tirol 2020a).

### **3.1.4 Geologische Karten**

Als Kartierungsgrundlagen wurden mehrere GEOFAST-Karten der Geologischen Bundesanstalt im Maßstab 1:50.000 herangezogen. GEOFAST-Karten setzen sich vorwiegend aus Archivunterlagen zusammen, ergänzend sind auch publizierte Karten enthalten. Eine Kontrolle mittels Geländebegehung erfolgt nicht (Geologische Bundesanstalt o. J.). Verwendet wurden die Blätter 145 Imst (Geologische Bundesanstalt 2011a), 146 Ötz (Geologische Bundesanstalt 2011b), 172 Weißkugel (Geologische Bundesanstalt 2012b) und 173 Sölden (Geologische Bundesanstalt 2012a). Die Karten wurden im PDF-Format heruntergeladen (verfügbar unter <https://www.geologie.ac.at/onlineshop/karten/geofast-karten>), anschließend in ArcGIS als Rasterdateien georeferenziert und zusammengefügt.

### **3.1.5 Ereignisdaten**

Alle Informationen zu vergangenen Ereignissen in den untersuchten Einzugsgebieten stammen aus dem digitalen Wildbach- und Lawinenkataster (WLK) des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) und wurden vom Institut für Alpine Naturgefahren (Boku Wien) bereitgestellt. Erfasst wurden diese Daten von MitarbeiterInnen der WLV im Rahmen der Ereignisdokumentation, die laufend in ganz Österreich getrennt nach den vier Kategorien Wasser, Rutschung, Steinschlag und Lawinen erfolgt (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2020c).

Die gegenständlichen Ereignisse sind jeweils mit einer eigene ID-Nummer versehen und liegen im GIS als Shapefiles in Form von Punkten vor, durch die der Ablagerungsbereich jedes Prozesses verortet ist. Zusätzlich sind für jedes Ereignis grundlegende Informationen wie Ereigniszeitpunkt (zumindest Datumsangabe), Prozessart (Hochwasser, fluvialer Feststofftransport, murartiger Feststofftransport, Murgang) und Intensitätsklasse (gering, mittel, stark, extrem) enthalten, teilweise sind auch eine geschätzte Ablagerungskubatur sowie das Auslöseereignis (z.B. Starkregen, Hagel, Schneeschmelze) angegeben. Da sich die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit auf die Ereignishäufigkeit von Muren beziehen, waren hierfür nur die Kategorien Ereigniszeitpunkt und Prozessart von Relevanz. Es wurden ausschließlich die Prozesse „murartiger Feststofftransport“ und „Murgang“ berücksichtigt.

### **3.1.6 Kegeldaten**

Die zusätzlich zu den Ereignisdaten verwendeten morphometrischen Merkmale der Ablagerungskegel (mittlere Neigung, Fläche, Melton-Zahl) wurden zum Teil den bereits bestehenden Kegelpolygonen von Kessler (2019) entnommen sowie zum Teil anhand eigener erstellter Polygone erhoben (siehe Kapitel 3.6).

### **3.1.7 Einzugsgebiete**

Die Einzugsgebietsflächen, deren Abgrenzung ebenfalls durch den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung erfolgte, wurden vom Institut für Alpine Naturgefahren (Boku Wien) als Shapefiles zu Verfügung gestellt. Da die Einzugsgebiete ursprünglich auch die Ablagerungskegel miteinschlossen, diese jedoch in Hinblick auf die weiteren Untersuchungen getrennt vom eigentlichen Einzugsgebiet (Sammelgebiet) betrachtet werden mussten, wurden sie vorab entfernt, sodass die neuen Einzugsgebiete nur dem jeweiligen Sammelgebiet entsprechen.

### **3.1.8 Gerinnenetz**

Das in den Kartierungen dargestellte Gerinnenetz wurde ebenfalls dem Land Tirol über „Open Data Österreich“ (verfügbar unter <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/cb2f663a-678e-4253-be61-f5125c14d143>) entnommen und beinhaltet zum Großteil die dauernd wasserführenden Gewässer (Land Tirol 2020b). Für die Abschätzung der geschieberelevanten Flächen sowie für die Berechnung der murfähigen Gerinnelängen wurde zudem ein eigenes genaueres Gerinne- und Runsennetz modelliert (siehe Kapitel 3.4.1).

## 3.2 Geologische Aufnahme

Die Basis der im Rahmen der Arbeit durchgeführten Analysen bildete die Kartierung aller zu Tage tretenden Fest- und Lockergesteinsvorkommen innerhalb der Einzugsgebietsgrenzen. Diese wurde in ArcGIS mittels der Erstellung von Flächenpolygonen (Shapefiles), einerseits im Zuge einer Fernerkundung unter Verwendung des digitalen Geländemodells (DGM) und aktueller Orthofotos, andererseits durch Übernahme bzw. Digitalisierung bereits bestehender Kartierungen (GEOFAST-Karten) durchgeführt. Festgesteine und Lockergesteine wurden dabei aufgrund der weiteren Vorgehensweise voneinander getrennt in eigenen Shapefiles behandelt, sollten aber letztendlich gemeinsam flächendeckend über das gesamte Untersuchungsgebiet abgebildet werden. Ergänzend wurden aktuelle Gletscherflächen und Seen in einer eigenen Klasse mit der Bezeichnung „Sonstiges“ aufgenommen.

Für die Interpretation von Geländestrukturen im Zuge der Fernerkundung wurde vorab mit Hilfe des Werkzeuges „Hillshade“ („Spatial Analyst Tools“) ein Schummerungsrelief (Hillshade) aus dem Raster des digitalen Geländemodells abgeleitet. Dieses entspricht einer in Graustufen gehaltenen dreidimensionalen Darstellung der Geländeoberfläche in Abhängigkeit der Beleuchtung durch eine relative imaginäre Lichtquelle (Sonne). Für die Sonnenposition wurden ein Höhenwinkel von  $45^\circ$  und ein Azimut von  $315^\circ$  (Nordwest einfallend) gewählt (Esri 2016).

Generell erweisen sich hochauflösende Luftbilder und Schummerungen besonders im Hochgebirge, wo manche Bereiche aufgrund des steilen, unwegsamen Geländes oft nicht für die geologische Aufnahme vor Ort zugänglich sind, als sehr vorteilhaft. Der Einsatz von Schummerungen eignet sich vor allem in bewaldeten Gebieten, wo man im Gegensatz zu Orthofotos durch die Vegetation „hindurchsehen“ kann (Ortner 2015). Zu erwähnen ist außerdem, dass eine geologische Kartierung im Gelände zwar hinsichtlich der Aufnahmegenaugigkeit niemals durch eine Fernerkundung ersetzt werden kann, jedoch des Zeitmangels wegen für das gesamte Untersuchungsgebiet nicht möglich war. Im Rahmen einer mehrtägigen Feldarbeit (siehe Kapitel 3.2.3) fand immerhin eine stichprobenartige Überprüfung der im GIS erstellten Fest- und Lockergesteinsflächen statt.

### 3.2.1 Kartierung der Festgesteine

Die Erfassung der Festgesteine erfolgte hauptsächlich über die Digitalisierung der geologischen Karten (GEOFAST-Karten, Maßstab 1:50.000). Für eine realitätsgetreuere Abgrenzung der erstellten Polygone wurden zusätzlich die aktuellen Orthofotos und das Hillshade verwendet. Lithologische Einheiten, die in mehreren der vier Kartenblättern zugleich auftreten und aufgrund leichter Abwandlungen in ihren Eigenschaften jeweils unterschiedlich benannt werden (z.B. durch den Zusatz „vorwiegend feinfaserig“), wurden für eine praktikablere Verwendung in den anschließenden Untersuchungen unter einer allgemeineren Bezeichnung zusammengefasst. So wurden beispielsweise die Einheiten „Biotit-Plagioklasgneis (Schiefergneis) und Gneisglimmerschiefer“ und „Zweiglimmeriger Schiefergneis (Biotit-Muskovit-Plagioklasgneis)“ und dem Namen „Schiefergneise und Gneisglimmerschiefer“ zusammengefügt.

In *Tabelle 3* sind alle Festgesteinsarten aufgelistet, die im Rahmen der Kartierung aufgenommen wurden.

*Tabelle 3: Im Rahmen der Kartierung erfasste Festgesteinsarten*

Kartierte Lithologien
Schiefergneise und Gneisglimmerschiefer
Feinkörniger Biotitschiefer
Biotitgranitgneis, Biotitaugengneis
Tonalitgneis
Zweiglimmeriger Augen- und Flasergneis
Muskovitgranitgneis
Aplit und Muskovitorthogneis
Amphibolit
Wechselserie (Amphibolit-Paragneis-Wechselagerung)
Quarzit

### 3.2.2 Kartierung der Lockergesteine

In den GEOFAST-Karten sind zwar neben den Festgesteinen auch größere quartäre Lockergesteinseinheiten wie etwa zusammenhängende Moränenfelder und mächtigere Schuttkegel abgebildet, allerdings sind solche in geringerem Ausmaß (z.B. lokale Hangschutt- und Moränenablagerungen, fluviatile Ablagerungen) nur vereinzelt dargestellt bzw. fehlt für manche Kartenbereiche die Darstellung der vorhandenen Lockergesteine ganz. Zudem sind aufgrund des relativ groben Maßstabs die Begrenzungen der Einheiten nicht sehr genau oder zum Teil auch nicht mehr aktuell (z.B. bei aktiven Blockgletschern). Daher wurde für die Aufnahme der Lockergesteine in erster Linie auf das hochauflösende Hillshade und die aktuellen Orthofotos zurückgegriffen.

Schummerungsdaten sind sehr nützlich, wenn es darum geht, morphologische Gegebenheiten und quartäre Ablagerungen zu kartieren. Während sich eine Aufnahme im Gelände oftmals als sehr aufwändig erweist, können dagegen im Hillshade schon geringmächtige Lockergesteinsauflagen auf dem Festgestein erfasst und abgegrenzt werden (Ortner 2015). Dank der hohen Auflösung des Digitalen Geländemodells (1 x 1 m) konnten auch feinere Geländestrukturen (z.B. Druckwülsten, Loben) und gegebenenfalls eine Transport- bzw. Sedimentationsrichtung der Ablagerung erkannt werden, was folglich die Abgrenzung von beispielsweise Schwemmfächern, fluviatilen Ablagerungen, Schuttkegeln und Blockgletschern erleichterte.

Für eine sinnvollere statistische Auswertung der Daten wurde versucht, die Anzahl der zu erfassenden Lockergesteinstypen gering zu halten, indem ähnliche Einheiten (z.B. fluviatile Sedimente, fluvioglaziale Sedimente) in Gruppen zusammengefasst wurden. Es wurde schließlich zwischen folgenden vier Typen von Lockergesteinen unterschieden:

- 1) Hangschutt, Blockschutt, Verwitterungsschutt (teils mit Moränenstreu)
- 2) Moräne (undifferenziert)
- 3) Blockgletscher
- 4) Fluviatile/fluvioglaziale Sedimente

Die Gruppe des Hang-, Block-, und Verwitterungsschutts (wird in weiterer Folge nur als „Hangschutt“ bezeichnet) umfasst alle infolge physikalischer Verwitterung (z.B. durch Frostsprengung) entstandenen Ansammlungen von Gesteinsbruchstücken unterschiedlichster

Größe, welche sich größtenteils unterhalb der Felswände in Form von Schuttkegeln ablagern, aber auch verschieden mächtige Auflagen direkt auf dem Festgestein bilden können. Aufgrund der Tatsache, dass Schutthalden oft direkt an Moränenablagerungen anschließen und diese in der Kartierung nicht immer exakt abgegrenzt werden können, kann den erfassten Schuttablagerungen lokal auch Moränenstreu beigemischt sein. Bei der Darstellung der Moränenablagerungen wurden sowohl Grund-, Seiten- und Mittelmoränen als auch Endmoränen berücksichtigt. Ein Großteil der Schuttkegel und Moränen im unteren Teil der Einzugsgebiete sind bewachsen.

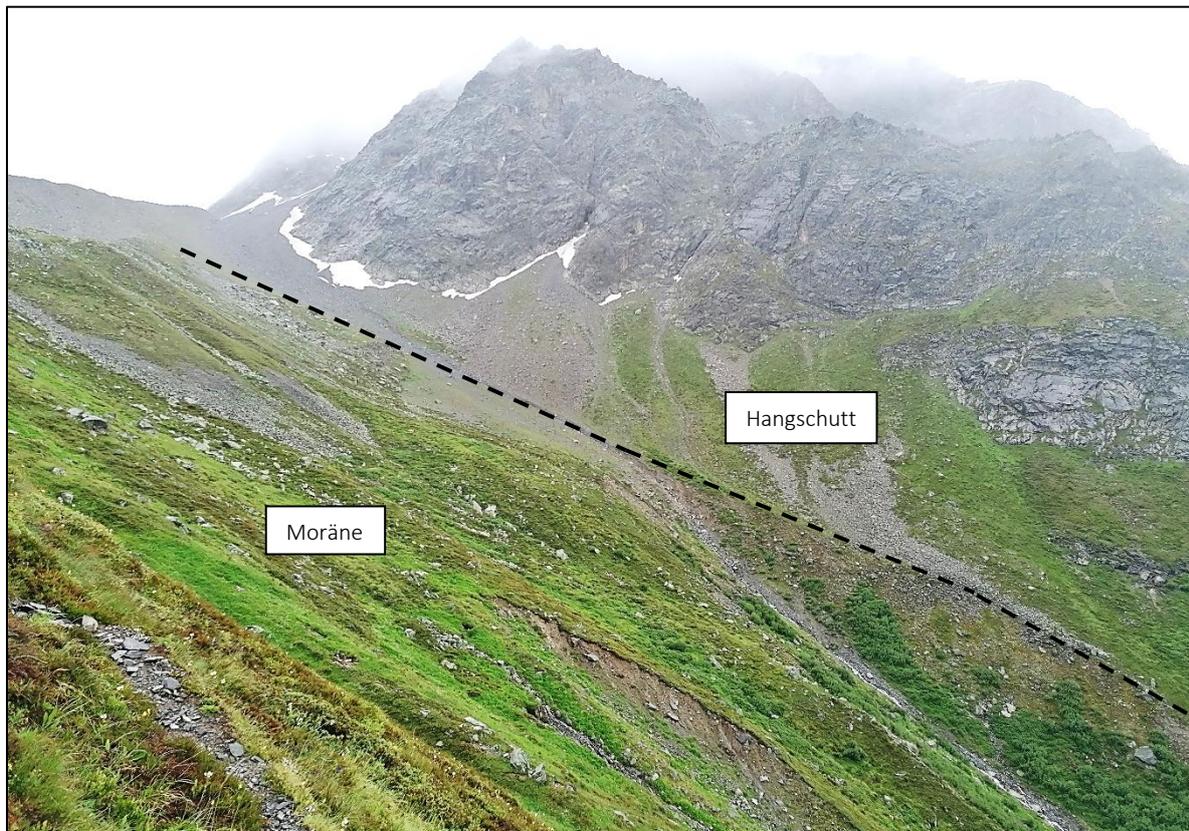


Abbildung 11: Abgrenzung der Lockergesteinstypen Moräne und Hangschutt im Gelände (Einzugsgebiet Kitzelesbach)

Die Erfassung der Blockgletscher erfolgte mit Hilfe der Publikation von Krainer (2015), welche eine Übersicht über die in den Öztaler und Stubai Alpen im Rahmen des „Blockgletscherinventar Tirol“ dokumentierten Blockgletschern gibt. Darin ist unter anderem die geographische Lage aller Blockgletscher im Pitztal mit einer Unterscheidung nach den Zuständen aktiv, inaktiv und fossil dargestellt. Mit den Polygonen der fluviatilen und fluvioglazialen Sedimente sollten letztendlich die in den Bächen, Gerinnen und Schmelzwasserströmen abgelagerten Sedimentvorkommen abgedeckt werden. Um den

Aufwand in Grenzen zu halten, wurden nur größere Sedimentkörper, die auch deutlich in den Fernerkundungsdaten erkennbar sind (z.B. Schwemmfächer, breitere Ablagerungs- bzw. Umlagerungsstrecken) aufgenommen.

An Stellen, an denen die auf der GEOFAST-Karte verzeichneten Gesteinsvorkommen aufgrund des Gletscherschwundes nicht ihrer derzeitigen Ausdehnung an der Oberfläche entsprechen, konnte mit Hilfe der Orthofotos die aktuelle Situation in der Kartierung berücksichtigt werden. In *Abbildung 12* ist die Kartierung der Fest- und Lockergesteine am Beispiel des Einzugsgebietes Leibach dargestellt.

### **3.2.3 Feldarbeit**

Im Juli 2020 fand eine mehrtägige Feldarbeit im Einzugsgebiet des Kitzelesbach statt, dessen vorrangiges Ziel es war, die Kartierung der Fest- und Lockergesteine stichprobenartig in ihrer Richtigkeit zu überprüfen. Zusätzlich sollte sich ein Bild von verschiedenen Festgesteinen hinsichtlich ihres strukturellen Aufbaus und der mechanischen Stabilität als Grundlage für die Einteilung nach der Verwitterungsanfälligkeit (siehe Kapitel 3.3) gemacht werden. Das Einzugsgebiet Kitzelesbach wurde deshalb ausgewählt, da es sowohl Vorkommen aller vier Lockergesteinstypen als auch Aufschlüsse der meisten Festgesteinsarten beinhaltet. Mit der Annahme, dass dieselben Gesteinstypen ähnliche Eigenschaften über das gesamte Untersuchungsgebiet hinweg zeigen, konnten die Erkenntnisse aus den hier durchgeführten Geländebeobachtungen repräsentativ für die Einheiten in den restlichen Einzugsgebieten übernommen werden. Eine Begehung des gesamten Untersuchungsgebietes hätten den Rahmen dieser Arbeit gesprengt.

Darüber hinaus wurden im Rahmen der Geländearbeit insgesamt 18 Proben von verschiedenen Lockermaterialablagerungen genommen. Konkret betreffen dies Hangschutt, Moränen, Blockgletscher, Levees, Murablagerungen und Ablagerungskegel. Die Proben sollen in weiteren Studien (z.B. Bachelor- oder Masterarbeit) unter anderem bezüglich ihrer Korngrößenverteilung und mineralogischen Zusammensetzung analysiert werden, um Erkenntnisse über die Murgangeigenschaften und die möglichen Auslösebereiche im Einzugsgebiet zu gewinnen.

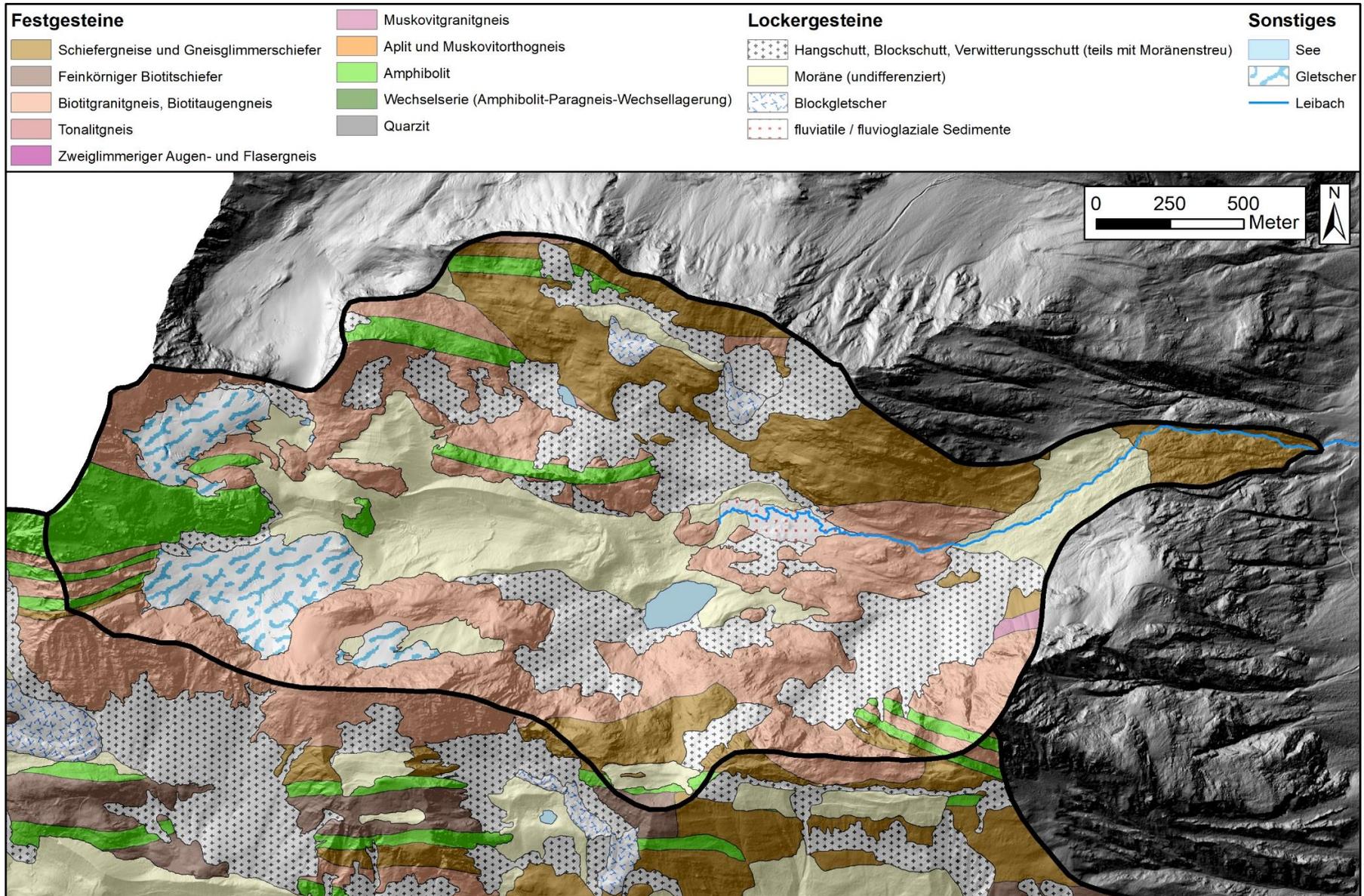


Abbildung 12: Kartierung der Fest- und Lockergesteine am Beispiel des Einzugsgebietes Leibach

### 3.3 Einteilung der Festgesteine nach Verwitterungsanfälligkeit

Im nächsten Schritt erfolgte die Einteilung der kartierten Festgesteine nach ihrer Verwitterungsanfälligkeit. Hierzu wurde der bereits in der Einleitung erwähnte und von Tiranti et al. (2014) eingeführte „Clay-Weathering-Index“ (CWI) verwendet, welcher die Festgesteine qualitativ nach ihrer Tendenz zu Ton oder tonähnlichen Mineralen (tonartige Schichtsilikate) zu verwittern unterteilt. Während in den Untersuchungen von Tiranti et al. (2014) die Einteilung der Gesteine in drei verschiedene Gruppen (Excellent Clay-Maker, Good Clay-Maker, Bad Clay-Maker) erfolgte, wurde in der vorliegenden Arbeit nur zwischen den zwei Gruppen Good Clay-Maker (GCM) und Bad Clay-Maker (BCM) unterschieden. Einzelne Lithologien der Good Clay-Maker hätten zwar hinsichtlich ihrer Eigenschaften auch einer Excellent Clay-Maker-Gruppe zugeordnet werden können (z.B. lokale Vorkommen des Feinkörnigen Biotitschiefers), aufgrund der relativ geringen Anzahl an untersuchten Einzugsgebieten wurde jedoch im Hinblick auf die anschließende statistische Auswertung auf eine zusätzliche dritte Gruppe verzichtet.

Für die Einteilung der Lithologien gemäß dem CWI wurde neben Geländebeobachtungen auf die Methode zur Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit von Gesteinen nach Hoek und Brown (1997) zurückgegriffen. Hierbei werden Festgesteine über die Anzahl an Schlägen, die es braucht, um ein Probenhandstück mit einem Geologenhammer zu zerbrechen, in Festigkeitsklassen unterteilt. Die Klassen sind durch einen minimalen und maximalen Druckfestigkeitswert definiert. Unterschieden werden die Terme „extrem stark“, „sehr stark“, „stark“, „mittelstark“, „schwach“, „sehr schwach“ und „extrem schwach“ (siehe *Tabelle 4*). Weil bei anisotropen Gesteinen (z.B. Schiefer) die Druckfestigkeit in Abhängigkeit der Druckrichtung variieren kann, wurden für eine einheitliche Abschätzung die Schläge immer senkrecht auf eine gegebene Foliation durchgeführt. Die Methode von Hoek und Brown (1997) wurde unter anderem auch von Tiranti et al. (2018) zur Unterscheidung der Festgesteine gemäß CWI verwendet, wohingegen Tiranti et al. (2014) angeben, die Grundgesteine im Rahmen mehrerer Geländebeobachtungen nach CWI unterteilt zu haben.

Tabelle 4: Vorgaben für die Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit im Gelände  
(Quelle: Hoek und Brown 1997, S.3)

Grade*	Term	Uniaxial Comp. Strength (MPa)	Point Load Index (MPa)	Field estimate of strength	Examples
R6	Extremely Strong	> 250	>10	Specimen can only be chipped with a geological hammer	Fresh basalt, chert, diabase, gneiss, granite, quartzite
R5	Very strong	100 - 250	4 - 10	Specimen requires many blows of a geological hammer to fracture it	Amphibolite, sandstone, basalt, gabbro, gneiss, granodiorite, limestone, marble, rhyolite, tuff
R4	Strong	50 - 100	2 - 4	Specimen requires more than one blow of a geological hammer to fracture it	Limestone, marble, phyllite, sandstone, schist, shale
R3	Medium strong	25 - 50	1 - 2	Cannot be scraped or peeled with a pocket knife, specimen can be fractured with a single blow from a geological hammer	Claystone, coal, concrete, schist, shale, siltstone
R2	Weak	5 - 25	**	Can be peeled with a pocket knife with difficulty, shallow indentation made by firm blow with point of a geological hammer	Chalk, rocksalt, potash
R1	Very weak	1 - 5	**	Crumbles under firm blows with point of a geological hammer, can be peeled by a pocket knife	Highly weathered or altered rock
R0	Extremely weak	0.25 - 1	**	Indented by thumbnail	Stiff fault gouge

\* Grade according to Brown [2]  
\*\* Point load tests on rocks with a uniaxial compressive strength below 25 MPa are likely to yield ambiguous results.

Von den untersuchten Festgesteinen konnten alle den Orthogneisen zugehörigen Typen (Biotitgranitgneis, Biotitaugengneis, Tonalitgneis, etc.) sowie die Quarzite als „extrem stark“ eingestuft werden. Die Amphibolite wurden der Klasse „sehr stark“ zugewiesen, die Gruppe der Schiefergneise und Gneisglimmerschiefer wurde als „stark“ und der Feinkörnige Biotitschiefer als „mittelstark“ eingeordnet.

Auf Basis dieser Abschätzung sowie anhand der strukturellen und geomechanischen Erscheinung der Gesteine im Gelände konnte eine Einteilung entsprechend dem CWI vorgenommen werden. So wurden der Feinkörnige Biotitschiefer und die Gruppe der Schiefergneise und Gneisglimmerschiefer, deren geschieferter bis blättriger Aufbau und vergleichsweise geringere Druckfestigkeit auf eine erhöhte Verwitterungsanfälligkeit hindeuten, als Klasse der Good Clay-Maker zusammengefasst. Die Orthogneise, Amphibolite und Quarzite zeigen dagegen ein massiges Auftreten bei gleichzeitig hoher Druckfestigkeit und wurden folglich der Klasse Bad Clay-Maker zugeteilt (siehe *Abbildung 13*).

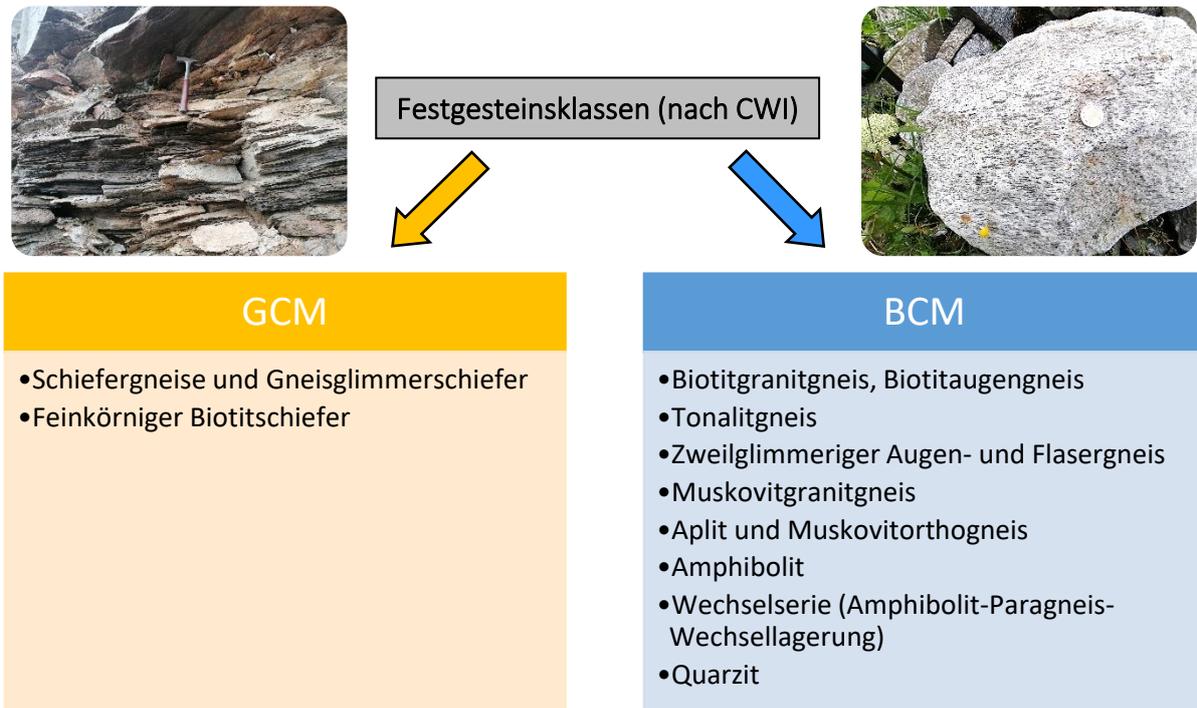


Abbildung 13: Einteilung der Festgesteinsarten nach dem Clay-Weathering-Index (CWI) in die zwei Klassen Good Clay-Maker (GCM) und Bad Clay-Maker (BCM)

In ArcGIS wurde schließlich jedem Festgesteinspolygon die seiner Gesteinsart entsprechende CWI-Klasse zugewiesen und für jedes Einzugsgebiet jeweils die Größe der gesamten GCM- und BCM-Fläche anhand des Werkzeuges „Tabulate Area“ ermittelt.

### 3.4 Abschätzung der geschieberelevanten Fläche

Die Ermittlung der geschieberelevanten Flächen bezieht sich im Gegensatz zur Einteilung nach der Verwitterungsanfälligkeit, welche nur die Festgesteine berücksichtigt, auf die kartierten Lockergesteinsflächen. Verwendet wurde hierzu das Konzept nach Heinimann et al. (1998), das auch in verschiedenen Murgangmodellierungen Anwendung findet (siehe z.B. Neuwirth 2011).

Das Verfahren von Heinimann et al. (1998) beruht auf einer morphologischen Gebietsanalyse, anhand welcher jene Flächen ermittelt werden, von denen Lockermaterial im Laufe der Zeit ins Gerinne gelangen kann und dann als Geschiebe für potenzielle Murgänge zur Verfügung steht (= sediment contributing area, SCA). Es wird angenommen, dass nicht das gesamte in einem Einzugsgebiet vorhandene Lockergestein für Muren zur Verfügung steht, sondern nur jene Ablagerungen, die eine gewisse Entfernung zum Gerinne und eine minimale Hangneigung aufweisen. Demnach bezieht sich die Methode auf die an den steilen Bacheinhängen stattfindenden Prozesse wie Ufererosionen, Spülprozesse und flachgründige Rutschungen. Die Größe der berechneten geschieberelevanten Fläche (SCA) stellt somit ein Maß für das verfügbare Lockermaterial dar. Es ist festzuhalten, dass dieses Verfahren nur zur groben Abschätzung des für Muren verfügbaren Sediments dient, da nur Flächen ermittelt und keine Unterschiede in den Mächtigkeiten der Lockergesteinsvorkommen berücksichtigt werden (Mittelsten Scheid 2011, Neuwirth 2011).

Heinimann et al. (1998) verwenden für die Ausweisung der SCA folgende Ausscheidungskriterien, welche auch für diese Arbeit übernommen wurden:

- Maximale Distanz zum Gerinne: 250m
- Minimale Hangneigung: 20°

#### 3.4.1 Modellierung des Gerinnenetzes

Voraussetzung für die Berechnung der geschieberelevanten Flächen ist die Ausweisung eines genauen Gerinne- und Runsennetzes in jedem Einzugsgebiet. Wichtig ist dabei, ein möglichst realitätsnahes Gerinnesystem abzubilden, in welchem auch Rinnen enthalten sind, die zwar nicht immer wasserführend sind, aber bei einem Niederschlagsereignis Material von den Einhängen in den Vorfluter transportieren können.

Mit Hilfe des Werkzeuges „Fill“ wurden zunächst unnatürliche Senken im digitalen Geländemodell, welche Bereiche ohne Abfluss darstellen, gesucht und angefüllt. Durch die Entfernung dieser Unregelmäßigkeiten konnte die Modellierung eines durchgängigen Drainagenetzwerkes ohne diskontinuierliche Gerinneabschnitte gewährleistet werden. Anschließend wurde mit dem Werkzeug „Flow Direction“ die Fließrichtung für jede Rasterzelle des DGM in Abhängigkeit seiner benachbarten Zellen ermittelt. Auf Grundlage dieses Fließrichtungsrasters wurde mittels „Flow Accumulation“ ein weiteres Raster erstellt, das den akkumulierten Abfluss angibt, welcher sich aus der gewichteten Akkumulation aller bezüglich der Fließrichtung oberhalb gelegenen Zellen ergibt. Um daraus ein Gerinnenetz abzuleiten, musste mit Hilfe des „Raster Calculator“ ein Schwellenwert für das Akkumulationsraster definiert werden, sodass nur Zellen mit einem bestimmten Mindestabfluss für die Ausweisung des Gerinnes übernommen wurden. Zellen, die diesen Wert nicht überstiegen, wurden durch Vergabe des Attributes „NoData“ nicht weiters berücksichtigt.

Nach der Umwandlung des erstellten Gerinnerasters in ein Shapefile (Befehl „Raster to Polyline“) wurden schließlich im Zuge einer manuellen Nachbearbeitung Rinnen und Runsen, die in Wirklichkeit nicht vorhanden waren oder in ihrem Verlauf nicht der Realität entsprachen entfernt bzw. verändert. Es wurde daher darauf geachtet, einen Schwellenwert zu wählen, welcher möglichst einer Darstellung des tatsächlich vorhandenen Gerinnesystems entsprach, jedoch lieber zu viele als zu wenige Bachläufe abbildete. Zudem wurden Gerinnestrecken oberhalb größerer Gletscherseen entfernt, da angenommen wurde, dass die Seen als Geschiebesenken wirken, ab denen das ankommende Material nicht mehr weiter nach unten transportiert wird.

### **3.4.2 Berechnung der Sediment Contributing Area (SCA)**

Nach Modellierung des Gerinnesystems erfolgte nun die Berechnung der geschieberelevanten Flächen. In einem ersten Schritt wurde mit dem Werkzeug „slope“ die Hangneigung in jeder Rasterzelle aus dem DGM ermittelt. Zur Erfüllung des Hangneigungskriteriums für die SCA (Hangneigung  $\geq 20^\circ$ ) wurden Zellen mit Neigungen geringer als  $20^\circ$  durch Vergabe des Attributes „NoData“ von den weiteren Berechnungen ausgeschlossen. Auf Basis des neu erstellten Neigungsrasters musste anschließend die Hanglänge jeder Zelle in einem neuen Raster ausgegeben werden. Dies geschah im „Raster Calculator“ durch Anwendung der Kosinus-Winkelfunktion, mit der über die Hangneigung (=Winkel Alpha) und der vorgegebenen

Zellenbreite von 1 m (= Ankathete) die Hanglänge (= Hypotenuse) für jede Zelle berechnet werden konnte. Dieses neue Raster stellt das sogenannte Kostenraster dar, auf dessen Grundlage mit Hilfe der Funktion „Cost Distance“ schließlich alle Flächen mit einer maximalen Entfernung zum Gerinne von 250 m ermittelt werden konnten. Durch Aufsummieren der entsprechenden Kosten (Hanglängen) berechnet „Cost Distance“ für jede Ausgabezelle die kleinste akkumulative Entfernung (Kostenentfernung) zu einer angegebenen Quelle, in diesem Fall zum modellierten Gerinnenetz. Vor Ausführung dieser Funktion musste als wesentlicher Punkt noch berücksichtigt werden, dass keine dem Gerinne abgewandten und außerhalb des jeweiligen Einzugsgebietes liegende Flächen als geschieberelevant ausgegeben werden dürfen. Hierzu wurden im Vorfeld durch Einspielung manuell definierter Abflusspunkte („Pour Points“) in die Funktion „Watershed“ feine Sub-Einzugsgebiete innerhalb der Untersuchungstäler ausgewiesen. Nach teilweiser Nachbearbeitung und Umwandlung der Sub-Einzugsgebietsgrenzen in ein Rasterformat wurden ihre Zellen auf „NoData“ gesetzt und mittels „Raster Calculator“ mit dem bereits erstellten Kostenraster kombiniert. So stellten die definierten Wasserscheiden Grenzen innerhalb der untersuchten Einzugsgebiete dar, die bei der Modellierung der SCA nicht überschritten werden konnten. Damit auch nur Lockergesteinsflächen als geschieberelevant eingestuft wurden, wurden schließlich die erhaltenen Flächen auf die Polygone der kartierten Lockergesteine „geclipped“.

Die Größe der gesamten SCA sowie ihre Anteile an den vier Lockergesteinstypen (Hangschutt, Moräne, Blockgletscher, fluviatile/fluvioglaziale Sedimente) wurden für jedes Einzugsgebiet mittels „Tabulate Area“ ermittelt.

In *Abbildung 14* sind die modellierten geschieberelevanten Flächen am Beispiel der Einzugsgebiete Kitzelesbach, Perlekarbach und Reiselebach dargestellt.

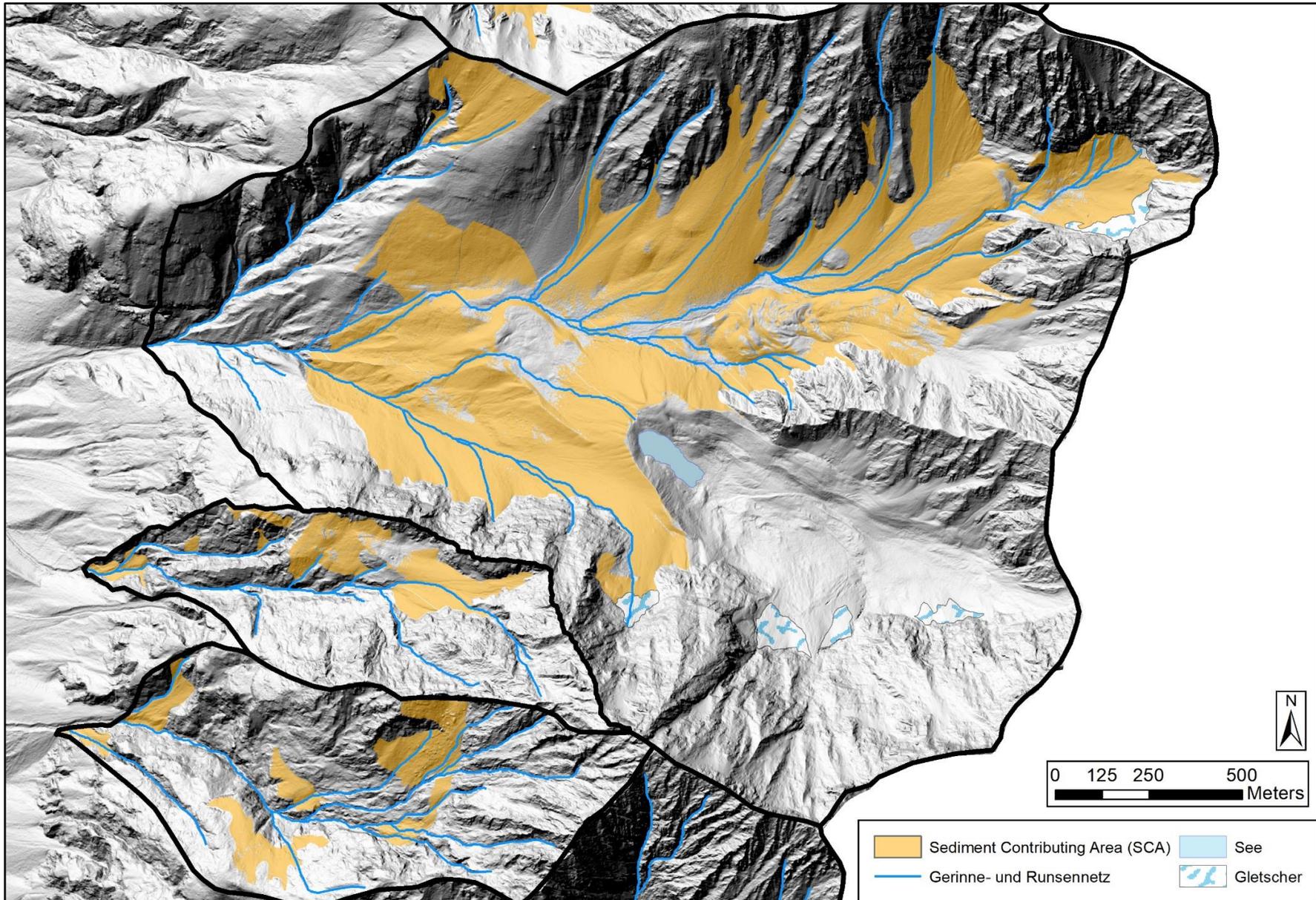


Abbildung 14: Berechnete Sediment Contributing Area (SCA) am Beispiel der Einzugsgebiete Kitzelesbach, Perlekarbach und Reiselebach (von Norden nach Süden)

### 3.5 Erhebung der morphometrischen Daten

Für die Untersuchung des morphometrischen Einflusses auf die Murgangaktivität wurden vier Parameter ausgewählt, die die morphologische Gestalt eines Einzugsgebietes bzw. dessen Gerinnes beschreiben. Neben den Merkmalen Mittlere Neigung, Melton-Zahl und Reliefverhältnis wurde hierbei die Länge des murfähigen Gerinnes berücksichtigt. Die Ermittlung dieser Parameter erfolgte in ArcGIS.

Die dimensionslose Melton-Zahl beschreibt die Reliefenergie eines Sammelgebietes und ergibt sich aus der maximalen Höhendifferenz im Einzugsgebiet (Relief) dividiert durch die Quadratwurzel der Einzugsgebietsfläche (Melton 1965). Demnach ist der Wert umso höher, je kleiner und steiler das Einzugsgebiet ist. Heiser et al. (2015) ziehen unter anderem die Melton-Zahl für ihr in den österreichischen Alpen entwickeltes Modell zur Vorhersage des vorherrschenden Wildbachprozesses im Einzugsgebiet heran und nennen dabei als Mindestwert für murartige Prozesse (murartiger Feststofftransport und Murgang) einen Melton-Wert von 0,69.

$$\text{Melton Zahl} = \frac{\Delta H}{\sqrt{A}}$$

Unter dem Reliefverhältnis versteht man die maximale Höhendifferenz im Einzugsgebiet dividiert durch die Länge des Einzugsgebiets. Je steiler und kürzer ein Einzugsgebiet ist, desto höher ist sein Reliefverhältnis (Strahler 1958).

$$\text{Reliefverhältnis} = \frac{\Delta H}{L}$$

Für die mittlere Neigung wurde mittels des Werkzeuges „Slope“ ein Neigungsraster aus dem DGM (1 x 1 m) abgeleitet und anschließend der Mittelwert für jedes Einzugsgebiet mit der Funktion „Zonal Statistics as Table“ ermittelt. Für die Berechnung der Melton-Zahl und des Reliefverhältnisses in Excel wurde der maximale Höhenunterschied im Einzugsgebiet ebenfalls aus dem DGM mittels „Zonal Statistics as Table“ entnommen, die Einzugsgebietsfläche und Einzugsgebietslänge konnten anhand der Einzugsgebietspolygone berechnet werden.

Dadurch, dass in den meisten Einzugsgebieten auch Gerinneabschnitte mit äußerst geringer Neigung (z.B. Ablagerungsstrecken, Kare, Sanderflächen) vorkommen, erreichen nicht alle ausgelösten Muren auch den unteren Ablagerungskegel. Da sich allerdings die Auswertung

anhand der Ereignis- und Kegeldata auf Ereignisse bezieht, deren Ablagerung am Kegel erfolgte, ist eine Berücksichtigung der Länge des tatsächlich murfähigen Gerinnes als Einflussparameter von wesentlicher Bedeutung. Bei der Länge des murfähigen Gerinnes handelt es sich um die von der Kegelspitze weg bauchaufwärts gemessene Gerinnesdistanz, auf der es durchgehend zur Überschreitung einer festgelegten Mindestneigung kommt. Basierend darauf wird angenommen, dass Muren, die in diesem Abschnitt initiiert werden, den Ablagerungskegel des Einzugsgebietes erreichen und nicht schon oberhalb zum Stehen kommen. Als Ausscheidungskriterium für das obere Ende des murfähigen Gerinnes wurde die Unterschreitung der Gerinneneigung von  $10^\circ$  über eine Distanz von mehr als 80 m gewählt. Diese Grenzwerte ergaben sich aus dem Vergleich mehrerer tatsächlich vorhandener, in den Erkundungsdaten (Orthofotos, Hillshade) erkennbarer Murenablagerungsstrecken. Dementsprechend stellen Bereiche, die dieses Kriterium erfüllen, Gerinneabschnitte dar, die von oberhalb ausgelösten Murgängen nicht überwunden werden können.

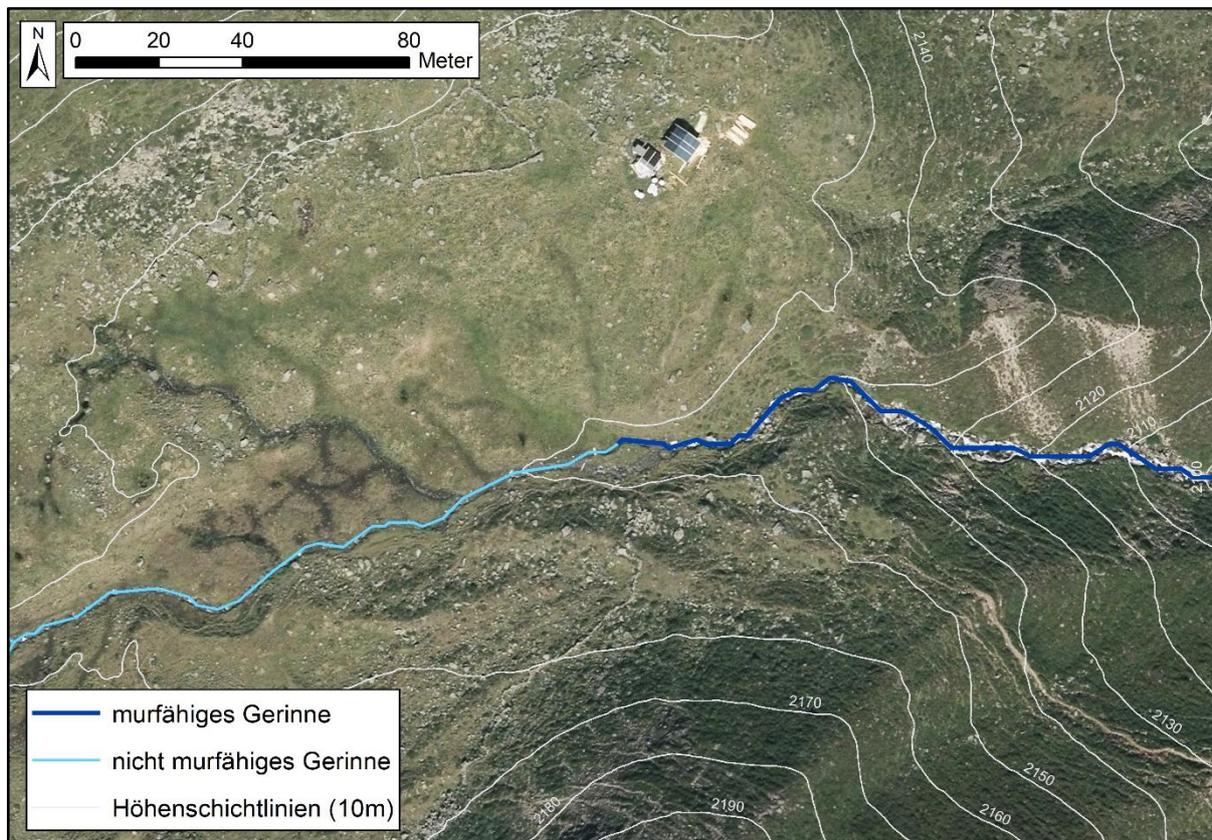


Abbildung 15: Darstellung des murfähigen Gerinnes am Beispiel des Einzugsgebietes Sagebach. Aufgrund des ausgedehnten Flachstückes wurde an dieser Stelle der oberhalb anschließende Gerinneabschnitt als nicht murfähig eingestuft und für die Berechnung der murfähigen Gerinnelänge entfernt.

Die Ausweisung der murfähigen Gerinnelängen erfolgte auf Basis des bereits für die Berechnung der SCA modellierten Gerinnesystems (siehe Kapitel 3.4.1). Nach Umwandlung in ein Rasterformat wurde den Gerinnelinien ein Neigungsraaster mittels der Funktion „Clip“ zugeschnitten. Anschließend wurden alle Bachläufe oberhalb von Stellen, an denen die genannten Ausscheidungskriterien erfüllt werden, entfernt. Hierbei wurden jeweils ausgehend vom Hauptgerinne auch alle Zubringer im Einzugsgebiet berücksichtigt. Die Gesamtlänge des murfähigen Gerinnes je Einzugsgebiet konnte schließlich mit Hilfe des Werkzeuges „Tabulate Intersection“ ermittelt werden.

### 3.6 Erhebung der Ereignis- und Kegeldaten

Repräsentativ für die Ereignishäufigkeit, hinsichtlich der die Einzugsgebiete in Abhängigkeit ihrer geologischen und morphometrischen Eigenschaften verglichen werden sollten, wurden einerseits Daten dokumentierter Murereignisse verwendet, des Weiteren wurden ausgewählte morphometrische Kegelmerkmale als Indikatoren für die Murgangaktivität in den Einzugsgebieten herangezogen.

Die Ereignisdaten vom Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung liegen für das gesamte Pitztal für einen Zeitraum von 1950 bis 2020 vor (nähere Beschreibung in Kapitel 3.1.5). Für jedes Einzugsgebiet wurden die Daten zu den zugehörigen Murereignissen aus der Datenbank exportiert und in eine Excel-Tabelle überführt. Es wurden nur Ereignisse mit den Prozesskategorien „Murartiger Feststofftransport“ und „Murgang“ berücksichtigt. Während Informationen zum Ereignisjahr und zur Magnitude für die Darstellung des zeitlichen Auftretens der Ereignisse verwendet wurden, war für die statistischen Analysen nur die Anzahl der stattgefundenen Ereignisse bedeutend.

Bei den von der WLW dokumentierten Ereignissen handelt es sich hauptsächlich um größere Murgänge in einem gewissen Schadensausmaß. Kleinere Ereignisse werden im Rahmen der Ereignisdokumentation oft nicht aufgenommen. Aufgrund dieses Umstandes und dadurch, dass generell nicht von einer Erfassung aller im Untersuchungsgebiet geschehenen Ereignisse ausgegangen werden kann, ist ein statistischer Vergleich der Einzugsgebiete rein auf Basis der Ereignisdaten kritisch zu sehen. Daher wurde entschieden, zusätzlich zu den Ereignisdaten auch ausgewählte morphometrische Merkmale der Ablagerungskegel in die Analysen einzubinden. Konkret betrifft dies die mittlere Neigung der Kegel, die Kegelfläche und die Melton-Zahl des Kegels. Dieser Ansatz beruht auf den Erkenntnissen von Kessler (2019), welcher für einen Teil der Einzugsgebiete im Pitztal den Zusammenhang zwischen der morphologischen Kegelausprägung und der jeweils dominierenden Prozessart untersuchte. Er konnte zeigen, dass sich hinsichtlich der erwähnten Kegelmerkmale ein hochsignifikanter Unterschied (für Mittlere Neigung und Melton-Zahl) bzw. ein signifikanter Unterschied (für Kegelfläche) zwischen den zwei Prozessgruppen („Hochwasser / fluvialer Feststofftransport“ und „murartiger Feststofftransport / Murgang“) ergeben. Demnach zeigen die Ablagerungskegel der von murartigen Prozessen dominierten Einzugsgebiete kleinere Flächen sowie deutlich höhere Neigungen und Melton-Zahlen als die Kegel, deren Einzugsgebiete von fluvialen

Prozessen beherrscht werden. Durch Verwendung dieser Kegelmerkmale in den statistischen Analysen kann zwar im Gegensatz zum Vergleich mit den Ereignisdaten keine direkte Aussage über den Einfluss der geologischen und morphometrischen Daten auf die Ereignishäufigkeit gemacht werden, jedoch können auf Basis der soeben beschriebenen Zusammenhänge zumindest Tendenzen in der Murgangaktivität abgeleitet werden. Die Murgangaktivität in einem Einzugsgebiet beschreibt in diesem Fall das Verhältnis zwischen dem Auftreten von murartigem Feststofftransport und Murgängen gegenüber jenem von fluvialem Feststofftransport und Hochwasser.

Da die von Kessler (2019) erstellten Geodaten für die vorliegende Arbeit zu Verfügung gestellt wurden, konnten für 11 der insgesamt 23 untersuchten Einzugsgebiete die Polygone der ausgewiesenen Kegelflächen direkt übernommen werden (siehe *Tabelle 5*). Für den Rest wurde in ArcGIS eine eigenständige Kartierung der Kegelflächen anhand der Fernerkundungsdaten durchgeführt (siehe *Abbildung 16*). Anschließend erfolgte für alle 23 Kegelpolygone die Berechnung der drei morphometrischen Merkmale (mittlere Neigung, Fläche, Melton-Zahl). Die Werte der bereits von Kessler (2019) berücksichtigten Kegel wurden somit nicht direkt übernommen, sondern neu berechnet, wodurch eine einheitliche Erhebung für alle Einzugsgebiete gewährleistet werden konnte.

*Tabelle 5: Auflistung der Einzugsgebiete, deren Kegel neu kartiert wurden und jener, bei denen die Kegelpolygone von Kessler (2019) übernommen wurden.*

Neu kartierte Kegel	Von Kessler (2019) übernommene Kegel
Äußerer Burgbach	Bichlbach
Dunkelrinnerbach	Hundsbach
Enzenstallermurbach	Kitzelesbach
Grünbach I	Lussbach
Grünbach II	Morlebach
Hairlachbach	Perlekarbach
Innerer Burgbach	Reiselebach
Karbach	Sagebach
Leibach	Saxuiererbach
Mitterbach	Söllbergbach
Neschelbach	Wassertalbach
Zaunhoferbach	

Die Größe der Kegelflächen wurde der Attributtabelle der Shapefiles entnommen. Die für die Berechnung der Melton-Zahl nötige maximale Höhendifferenz konnte auf Basis des DGMs mit Hilfe der Funktion „Zonal Statistics as Table“ eruiert werden. Bei der Erhebung der mittleren Kegelneigung wurde für das DGM anstatt der ursprünglichen Auflösung von 1 x 1 m eine Modellauflösung von 50 x 50 m verwendet, was durch die Anwendung des Werkzeuges „Resample“ realisiert werden konnte. Zweck dieser Auflösungsverminderung war, eine Glättung der Kegeloberfläche zu erreichen, um künstliche Geländeänderungen, etwa durch Schutzverbauungen oder in Siedlungsbereichen, von der Neigungsberechnung auszuschließen. Basierend auf dem neuen DGM wurde das Neigungsraaster mit Hilfe der Funktion „Slope“ modelliert und anschließend die mittlere Neigung je Kegel abgeleitet („Zonal Statistics as Table“). Alle Kegeldata wurden schließlich nach Excel transferiert, wo auch die Berechnung der Melton-Zahlen der Kegel erfolgte.

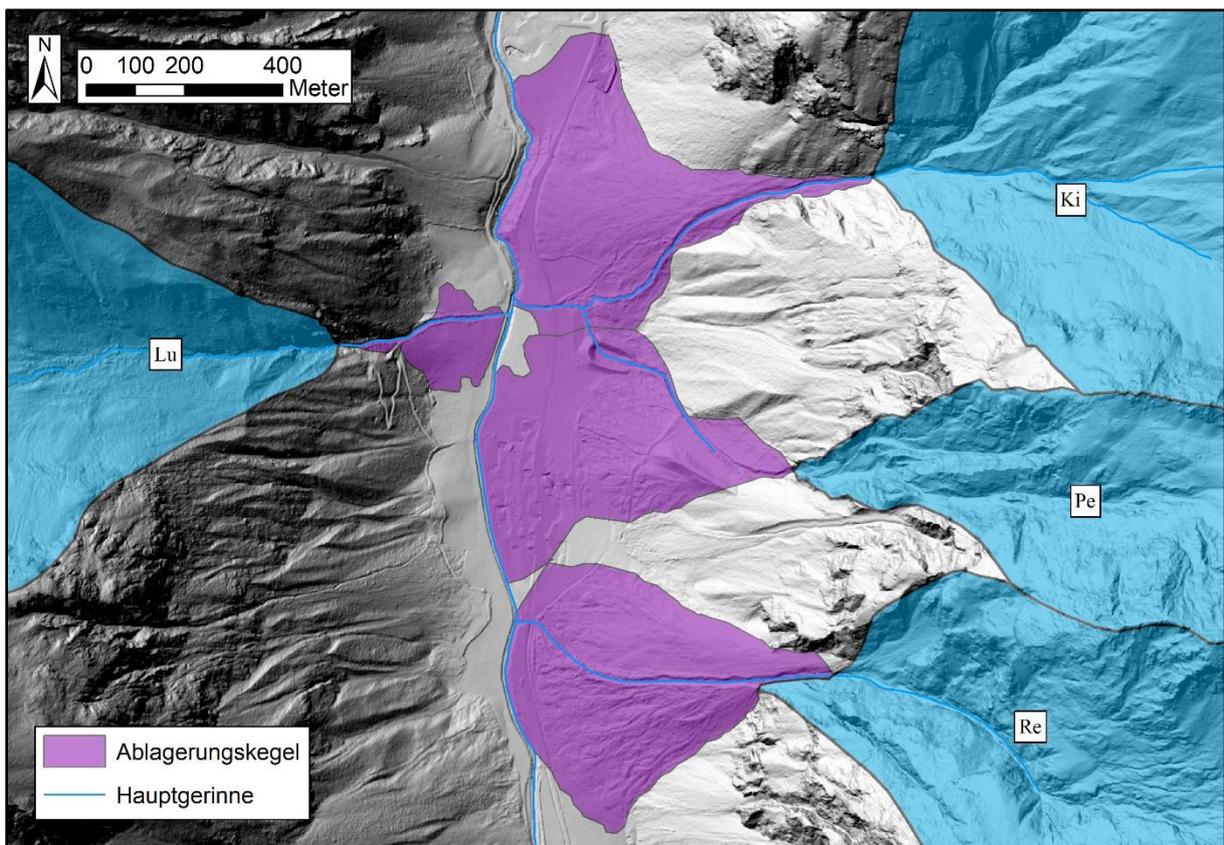


Abbildung 16: Kartierte Ablagerungskegel am Beispiel der Einzugsgebiete Lussbach, Kitzelesbach, Perlekarbach und Reiselebach

### 3.7 Datenaufbereitung

Alle erhobenen Werte zur Geologie und Geomorphometrie, zu den Ereignissen wie zu den morphometrischen Kegelmerkmalen wurden gemeinsam in einer Excel-Datei gesammelt und für die statistischen Analysen aufbereitet.

Im Falle der Festgesteine wurden die absoluten Größen der GCM- und BCM-Flächen in prozentuelle Anteile an der gesamten Festgesteinsfläche je Einzugsgebiet umgerechnet. Ebenso wurden die absoluten Werte der Sediment Contributing Area in prozentuelle Anteile an der Einzugsgebietsfläche umgewandelt sowie die Anteile der einzelnen Lockergesteinstypen an der gesamten SCA ermittelt.

Tiranti et al. (2014) teilten zudem die Einzugsgebiete nach der dominierenden CWI-Klasse in GCM- und BCM-Einzugsgebiete ein und stützten darauf ihre statistische Analyse. Würde man dies auch für den vorliegenden Fall übernehmen, würde sich aufgrund der meist knapp überwiegenden BCM-Anteile eine vergleichsweise geringe Anzahl an GCM-Einzugsgebieten gegenüber den BCM-Einzugsgebieten ergeben, worunter die Aussagekraft der statistischen Ergebnisse leiden würde. Aus diesem Grund wurden nur die Flächenanteile der beiden CWI-Gruppen berücksichtigt.

Es wurde schließlich eine gemeinsame Tabelle angelegt, in der jedem Einzugsgebiet die Werte der untersuchungsrelevanten geologischen (GCM-Anteil, SCA-Anteil, Anteil je Lockergesteinstyp an der SCA), morphometrischen (mittlere Neigung, Melton-Zahl, Reliefverhältnis) und ereignis- und kegelbezogenen Parameter (Ereignisanzahl, mittlere Kegelneigung, Kegelfläche, Melton-Zahl Kegel) zugewiesen wurden.

### 3.8 Statistische Analysen

Zur Beantwortung der Fragestellungen wurden die erhobenen Daten statistischen Korrelationsanalysen unterzogen, welche den Zusammenhang zwischen zwei Parametern prüfen. Hierbei wurden die Ereignis- und Kegeldaten als abhängige Variablen und die geologischen und geomorphometrischen Merkmale als unabhängige Variablen betrachtet. Die Durchführung der statistischen Tests erfolgte im Statistikprogramm „R“.

Für die Auswahl des geeigneten Testverfahrens mussten alle Datenreihen zunächst auf Normalverteilung geprüft werden. Hierzu wurde der Shapiro-Wilk-Test verwendet, bei dem es sich um den „Anpassungstest mit der höchsten Güte unabhängig von der Stichprobengröße“ handelt (Duller 2018, S. 65). Somit eignet sich dieses Verfahren gut für die im gegebenen Fall kleine Messwertanzahl. Die Nullhypothese, die besagt, dass die getesteten Daten normalverteilt sind, wird abgelehnt, wenn der errechnete Wahrscheinlichkeitswert (p-Wert) das Signifikanzniveau von 0,05 unterschreitet (Duller 2018).

Der statistische Vergleich von Datengruppen, bei denen jeweils eine Normalverteilung vorliegt, wurde in weiterer Folge anhand des Korrelationskoeffizienten nach Bravais-Pearson durchgeführt. Als parametrischer Test setzt diese Korrelationsanalyse nämlich eine Normalverteilung beider Merkmale voraus. Auf Basis der Kovarianz zwischen den beiden Variablen wird der Korrelationskoeffizient  $\rho$  (rho) ermittelt, der mit Werten zwischen -1 und 1 die Stärke des Zusammenhanges wiedergibt. Bei positivem Vorzeichen besteht ein gleichsinniger Zusammenhang, bei negativem Vorzeichen ein gegensinniger Zusammenhang. Je stärker der Zusammenhang ist, desto näher liegt der Koeffizient bei 1 bzw. -1. Zu erwähnen ist, dass den Variablen stets ein linearer Zusammenhang unterstellt wird (Duller 2018).

Für die Datenreihen, bei denen keine Normalverteilung nachgewiesen werden konnte, wurde als alternative Methode die Rangkorrelation nach Spearman verwendet, die zumindest ordinalskalierte Daten voraussetzt. Ihre Berechnung beruht auf der Ordnung der Messwerte gemäß ihrer Größe und der anschließenden Zuweisung von Rängen in beiden Datenreihen. Die Abstände zwischen den Werten werden somit nicht berücksichtigt. Gleichen Werten wird jeweils die gemittelte Rangnummer vergeben (Bsp.: Rang 5 und Rang 6 werden jeweils zu Rang 5,5). Der auf Basis dieser Reihungen berechnete Spearmansche Rangkorrelationskoeffizient  $\rho$  spiegelt auch hier die Stärke des linearen Zusammenhanges wider (je näher bei 1 bzw. -1, desto stärker), während sein Vorzeichen die Richtung des Zusammenhanges angibt (Duller 2018).

Zur Beschreibung der Stärke des Zusammenhanges wird für beide Korrelationskoeffizienten folgende Einteilung verwendet:

Tabelle 6: Bezeichnungen für die Stärke der Korrelation (Quelle: nach Viles 2020)

Wertebereich für $\rho$	Stärke des Zusammenhanges
$\rho \leq 0,2$	sehr schwach
$0,2 \leq \rho \leq 0,4$	schwach
$0,4 \leq \rho \leq 0,6$	mittel
$0,6 \leq \rho \leq 0,8$	stark
$0,8 \leq \rho \leq 1,0$	sehr stark

Darüber hinaus wird in beiden Korrelationsverfahren ein Zusammenhang als signifikant angesehen, wenn der zusätzlich berechnete p-Wert (Signifikanzwert) unter 0,05 liegt. Der p-Wert spiegelt die Irrtumswahrscheinlichkeit wider und ergibt sich aus dem Verhältnis zwischen der Korrelationsstärke und der Stichprobengröße. Je kleiner die Stichprobe ist, desto höher muss die Korrelation ausfallen, damit sie als signifikant eingestuft werden kann (Ebermann 2010).

Letztendlich wurde mittels dieser beiden Testverfahren die Korrelationen der geologischen und morphometrischen Datensätze (unabhängige Variablen) einerseits mit der Ereignisanzahl je Einzugsgebiet, andererseits jeweils mit den drei morphometrischen Kegelmerkmalen (abhängige Variablen) geprüft. Zur grafischen Veranschaulichung der Zusammenhänge wurden für ausgewählte Korrelationsergebnisse die verwendeten Datensätze in einem Streudiagramm gegeneinander aufgetragen. Die dabei resultierende Punktwolke stellt immer die Einzugsgebiete in Abhängigkeit zweier Merkmalsausprägungen dar. Durch Einfügen einer linearen Trendlinie und Beschriftung der Punkte mit den Einzugsgebietskürzeln sollen die Korrelationen noch besser veranschaulicht werden.

Um auch den Zusammenhang der unabhängigen Variablen (geologische und morphometrische Parameter) untereinander in der Auswertung berücksichtigen zu können, erfolgte in einem weiteren Schritt die Überprüfung der unabhängigen Daten auf Multikollinearität. Multikollinearität liegt vor, wenn eine hohe Korrelation zwischen zwei oder mehreren unabhängigen Größen besteht und diese somit zum Teil die gleichen Informationen abdecken. Sie kann in multiplen Regressionsanalysen zu einer fehlerhaften Schätzung des

Korrelationskoeffizienten führen (Wollschläger 2017). Obwohl in der gegenständlichen Arbeit nur bivariate Korrelationsanalysen durchgeführt wurden, ist es dennoch wichtig, eventuelle Wechselwirkungen zwischen den unabhängigen Größen in der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen. Dementsprechend wurde eine Streudiagramm-Matrix aus allen unabhängigen Parametern erstellt, womit auffallende Korrelationen untereinander erkannt werden sollen.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Erhobene Parameter

Im Folgenden werden die Ergebnisse aller erhobenen Merkmale dargelegt und näher beschrieben. Die Darstellung der kartierten Festgesteinsflächen (unterteilt in GCM und BCM), Lockergesteinsflächen, Ablagerungskegel sowie der berechneten geschieberelevanten Flächen für jedes Einzugsgebiet befindet sich im Anhang.

#### 4.1.1 *Morphometrische und geologische Merkmale*

*Tabelle 7* beinhaltet die Ergebnisse aller untersuchungsrelevanten morphometrischen und geologischen Parameter je Einzugsgebiet.

Bei Betrachtung der mittleren Neigungswerte zeigt sich eine deutliche Spannweite zwischen den Einzugsgebieten. Während das Einzugsgebiet Mitterbach mit einem Wert von  $26,4^\circ$  die kleinste mittlere Hangneigung aufweist, stellt der Reiselebach mit  $49,6^\circ$  das durchschnittlich steilste Einzugsgebiet dar. Der Mittelwert über das gesamte Untersuchungsgebiet liegt bei  $37,5^\circ$ . Im Falle der Melton-Zahlen zeigen bis auf den Lussbach (0,59) alle Einzugsgebiete Werte über 0,69 und sind demzufolge nach der Unterscheidung von Heiser et al. (2015) wie angenommen dem murartigen Prozessregime (murartiger Feststofftransport, Murgang) zuzuordnen. Für den Perlekarbach ergibt sich mit 2,05 die größte Melton-Zahl. Demnach liegt auch hier eine große Differenz zwischen dem minimalen (0,59) und maximalen Wert (2,05) vor. Der durchschnittliche Melton-Faktor beträgt 1,21. Die Reliefverhältnisse liegen wiederum zwischen 0,32 (Lussbach) und 0,91 (Perlekarbach), der Mittelwert beläuft sich auf 0,61. Bezüglich der Längen des murfähigen Gerinnes weist der Bichlbach mit 26,9 km die mit Abstand längste murfähige Strecke auf. Für alle restlichen 22 Einzugsgebieten ergeben sich Längen zwischen 1,3 km (Enzenstallermurbach) und 13,6 km (Grünbach I), wobei in 11 Tälern die murfähige Gerinnelänge unter 6 km bleibt. Setzt man allerdings die murfähigen Längen ins Verhältnis zur Gesamtgerinnelänge je Einzugsgebiet, zeigt sich ein anderes Muster, wie in *Abbildung 17* zu sehen ist. In 14 Einzugsgebieten wurde das gesamte Gerinne als murfähig ausgewiesen, wohingegen in den restlichen Tälern der Anteil der murfähigen Gerinnelänge am Gesamtgerinne zwischen 77,8% (Saxuirerbach) und 13,1% (Lussbach) liegt.

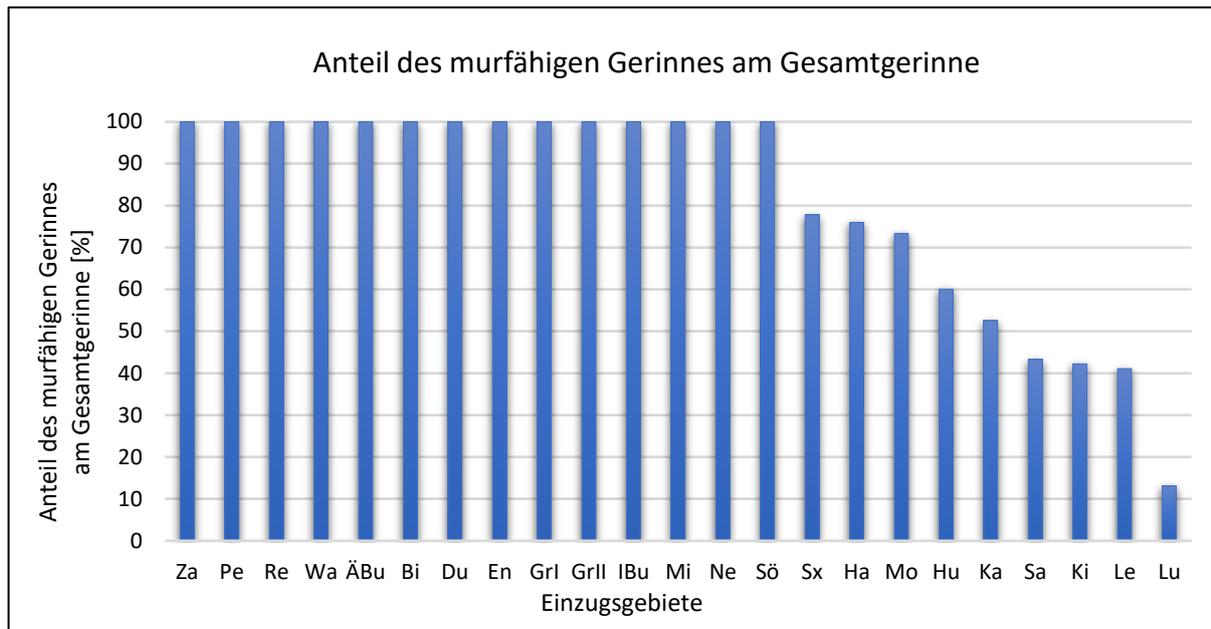


Abbildung 17: Anteile der murfähigen Gerinnelängen am Gesamtgerinne je Einzugsgebiet

Der Anteil der Good Clay-Maker-Gesteine an der Festgesteinsfläche variiert stark zwischen den Untersuchungstälern. Gegenüber Einzugsgebieten wie Bichlbach und Sagebach, die mit 86,4% bzw. 84,3% die größten GCM-Anteile aufweisen, kommen drei Einzugsgebiete vor, die keine GCM-Einheiten beinhalten, sondern rein aus BCM-Festgesteinen zusammengesetzt sind (Dunkelrinnerbach, Grünbach II, Perlekarbach). Im Durchschnitt beträgt der GCM-Anteil im Untersuchungsgebiet 24,9%, dementsprechend liegt der BCM-Anteil bei 75,1%. Eine wesentlich geringere Streuung ergibt sich bei den Anteilen der Sediment Contributing Area an der Einzugsgebietsfläche. Hier liegt der Maximalwert bei 53,8% (Grünbach II), der Minimalwert bei 7,0% (Mitterbach) sowie der Durchschnittswert bei 29,4%. Bei den Anteilen der verschiedenen Lockergesteinstypen (Hangschutt, Moräne, Blockgletscher, fluviatil/fluvioglazial) fällt auf, dass vor allem der Typ Hangschutt, gefolgt vom Typ Moräne, die SCA in den meisten Einzugsgebieten dominiert. Bis auf drei Täler, in denen die SCA zur Gänze aus Moräne zusammengesetzt ist (Enzenstallermurbach, Grünbach II, Mitterbach), liegt der Anteil an Hangschutt in allen Einzugsgebieten nie unter 40%. In drei Einzugsgebieten besteht die SCA sogar zu 100% aus Hangschutt (Dunkelrinnerbach, Reiselebach, Wassertalbach). Im Durchschnitt wurden 62,4% Hangschutt und 33,8% Moräne als geschieberelevant ausgewiesen. Demgegenüber weisen die Typen Blockgletscher und fluviatile/fluvioglaziale Sedimente mit mittleren Anteilen von 3,1% bzw. 0,7% äußerst geringe Vorkommen an der SCA auf.

Tabelle 7: Ergebnisse der untersuchungsrelevanten morphometrischen und geologischen Parameter je Einzugsgebiet

\*Anteil an der Einzugsgebietsfläche; \*\*Anteil an der SCA je Einzugsgebiet (HS...Hangschutt, M...Moräne, BG...Blockgletscher, FL...fluviatile/fluvioglaziale Sedimente)

Einzugsgebiete	Morphometrie				Geologie					
	mittlere Neigung [°]	Melton-Zahl	Reliefverhältnis	Länge murfähiges Gerinne [m]	Anteil GCM [%]	Anteil SCA* [%]	Anteil HS** [%]	Anteil M** [%]	Anteil BG** [%]	Anteil FL** [%]
Äußerer Burgbach	34,6	1,46	0,59	4 463	13,8	49,1	65,8	34,2	0,0	0,0
Bichlbach	37,1	0,82	0,64	26 872	86,4	20,9	73,7	16,8	6,9	2,6
Dunkelrinnerbach	43,2	1,68	0,92	1 612	0,0	18,1	100,0	0,0	0,0	0,0
Enzenstallermurbach	39,9	1,88	0,69	1 327	11,7	34,2	0,0	100,0	0,0	0,0
Grünbach I	38,6	1,31	0,63	13 581	16,5	38,2	54,0	46,0	0,0	0,0
Grünbach II	37,0	1,48	0,65	2 260	0,0	53,8	0,0	100,0	0,0	0,0
Hairlachbach	38,4	1,03	0,54	12 054	23,1	32,8	79,0	12,5	8,5	0,0
Hundsbach	35,3	0,77	0,47	10 818	6,8	33,9	75,4	22,1	2,5	0,0
Innerer Burgbach	35,1	1,60	0,70	2 231	9,3	51,9	63,5	36,5	0,0	0,0
Karbach	37,3	1,19	0,64	2 761	9,3	34,9	83,3	13,8	3,0	0,0
Kitzelesbach	38,8	0,75	0,51	7 024	33,6	26,5	57,2	25,6	14,9	2,3
Leibach	33,1	0,87	0,43	6 197	30,7	17,0	57,0	40,0	2,8	0,1
Lussbach	34,3	0,59	0,32	5 938	23,8	29,7	47,3	42,0	8,7	2,0
Mitterbach	26,4	1,09	0,58	1 951	37,7	7,0	0,0	100,0	0,0	0,0
Morlebach	38,9	1,05	0,60	10 336	2,8	25,6	89,7	2,2	5,2	2,8
Neschelbach	35,7	1,22	0,60	10 124	19,6	37,7	53,3	46,7	0,0	0,0
Perlekarbach	43,7	2,05	0,91	3 048	0,0	16,2	95,9	0,0	0,0	4,1
Reiselebach	49,6	1,75	0,87	5 292	12,2	14,4	100,0	0,0	0,0	0,0
Sagebach	34,5	0,70	0,42	10 671	84,3	34,9	63,2	26,0	8,8	2,0
Saxuirerbach	37,8	0,95	0,46	7 954	54,7	29,9	71,7	18,9	9,4	0,0
Söllbergbach	33,4	0,81	0,58	10 665	30,0	10,7	62,0	37,8	0,2	0,0
Wassertalbach	46,6	1,11	0,68	12 073	55,8	17,9	100,0	0,0	0,0	0,0
Zaunhoferbach	33,3	1,64	0,62	5 910	10,4	40,7	44,4	55,6	0,0	0,0

#### 4.1.2 Ereignis- und Kegeldaten

In *Tabelle 8* sind die erhobenen Ereignis- und Kegeldaten je Einzugsgebiet angeführt.

Insgesamt konnten im Untersuchungsgebiet 95 Murereignisse für den Zeitraum von 1950 bis 2020 erfasst werden. Die meisten Ereignisse fanden im Einzugsgebiet des Enzenstallermurbachs statt (12 Ereignisse), gefolgt von den Tälern Grünbach II und Mitterbach (jeweils 10 Ereignisse). In vier der insgesamt 23 Einzugsgebiete fanden laut Ereignisdokumentation der WLV keine Ereignisse statt (Äußerer Burgbach, Dunkelrinnerbach, Leibach, Saxuierbach), für drei Einzugsgebiete ist jeweils nur ein einziger Murgang dokumentiert (Innerer Burgbach, Lussbach, Sagebach). Im Mittel wurden 4,1 Ereignisse pro Einzugsgebiet erfasst.

Hinsichtlich der morphometrischen Kegeldaten sind markante Unterschiede über das gesamte Untersuchungsgebiet hinweg zu erkennen. Die größten mittleren Kegelneigung weisen die Einzugsgebiete Karbach ( $25,2^\circ$ ), Dunkelrinnerbach ( $24,1^\circ$ ) und Grünbach I ( $21,0^\circ$ ) auf, während der Kegel des Wassertalbachs mit einer mittleren Neigung von  $9,6^\circ$  die untere Grenze bildet. Im Durchschnitt beträgt die mittlere Kegelneigung  $16,0^\circ$ . Die mit Abstand flächengrößten Ablagerungskegel gehören den Einzugsgebieten Wassertalbach ( $0,35 \text{ km}^2$ ) und Hairlachbach ( $0,31 \text{ km}^2$ ) an. Die Minimalwerte wurden bei den Kegeln des Äußeren Burgbachs ( $0,02 \text{ km}^2$ ) und des Lussbachs ( $0,03 \text{ km}^2$ ) gemessen. Die Flächenwerte der restlichen Ablagerungskegel streuen um einen Mittelwert von  $0,15 \text{ km}^2$ . Im Falle der ermittelten Melton-Zahlen zeigt der Kegel des Karbachs mit einem Wert von 0,87 die höchste Reliefenergie. Das Minimum liegt bei 0,22 und wurde für den Kegel des Sagebach gemessen. Die durchschnittliche Kegel-Melton-Zahl beträgt 0,48.

Tabelle 8: Ergebnisse der erhobenen Ereignis- und Kegeldaten je Einzugsgebiet

Einzugsgebiete	Ereignisdaten	Kegeldaten		
	Anzahl Ereignisse (seit 1950)	mittlere Neigung [°]	Kegelfläche [m <sup>2</sup> ]	Melton-Zahl
Äußerer Burgbach	0	14,7	23 189	0,45
Bichlbach	8	12,0	141 823	0,29
Dunkelrinnerbach	0	24,1	104 611	0,50
Enzenstallermurbach	12	18,8	155 470	0,72
Grünbach I	4	21,0	33 993	0,50
Grünbach II	10	18,6	90 283	0,56
Hairlachbach	4	14,6	313 615	0,38
Hundsbach	8	15,5	218 884	0,41
Innerer Burgbach	1	20,8	46 798	0,57
Karbach	2	25,2	171 975	0,87
Kitzelesbach	4	14,3	190 494	0,60
Leibach	0	13,4	41 128	0,46
Lussbach	1	14,6	30 037	0,57
Mitterbach	10	18,4	180 777	0,55
Morlebach	2	11,7	148 428	0,34
Neschelbach	3	15,1	133 520	0,43
Perlekarbach	7	13,1	182 190	0,47
Reiselebach	5	18,4	195 121	0,62
Sagebach	1	12,9	265 702	0,22
Saxuirerbach	0	13,2	265 702	0,35
Söllbergbach	2	10,8	130 628	0,31
Wassertalbach	4	9,6	347 392	0,30
Zaunhoferbach	7	17,6	47 426	0,51

## 4.2 Untersuchung auf Multikollinearität

Bevor die eigentlichen statistischen Ergebnisse behandelt werden, soll noch auf die Korrelationen der unabhängigen Variablen untereinander eingegangen werden. *Abbildung 18* enthält die Streudiagramm-Matrix der geomorphometrischen und geologischen Parameter. Eine starke lineare und negative Korrelation ergibt sich zwischen den Parametern „Anteil Hangschutt“ und „Anteil Moräne“. Positive lineare Beziehungen sind zwischen dem Reliefverhältnis und der Melton-Zahl sowie in schwächerer Form zwischen dem Reliefverhältnis und der mittleren Neigung erkennbar. Zudem zeigt sich eine tendenzielle Abnahme der murfähigen Gerinnelänge wie auch des GCM-Anteils mit steigender Melton-Zahl. Für den Parameter Anteil Hangschutt lassen sich positive Zusammenhänge mit der mittleren Neigung und dem Reliefverhältnis feststellen. Die genannten Wechselwirkungen sind in der Interpretation der eigentlichen statistischen Ergebnisse zu berücksichtigen.

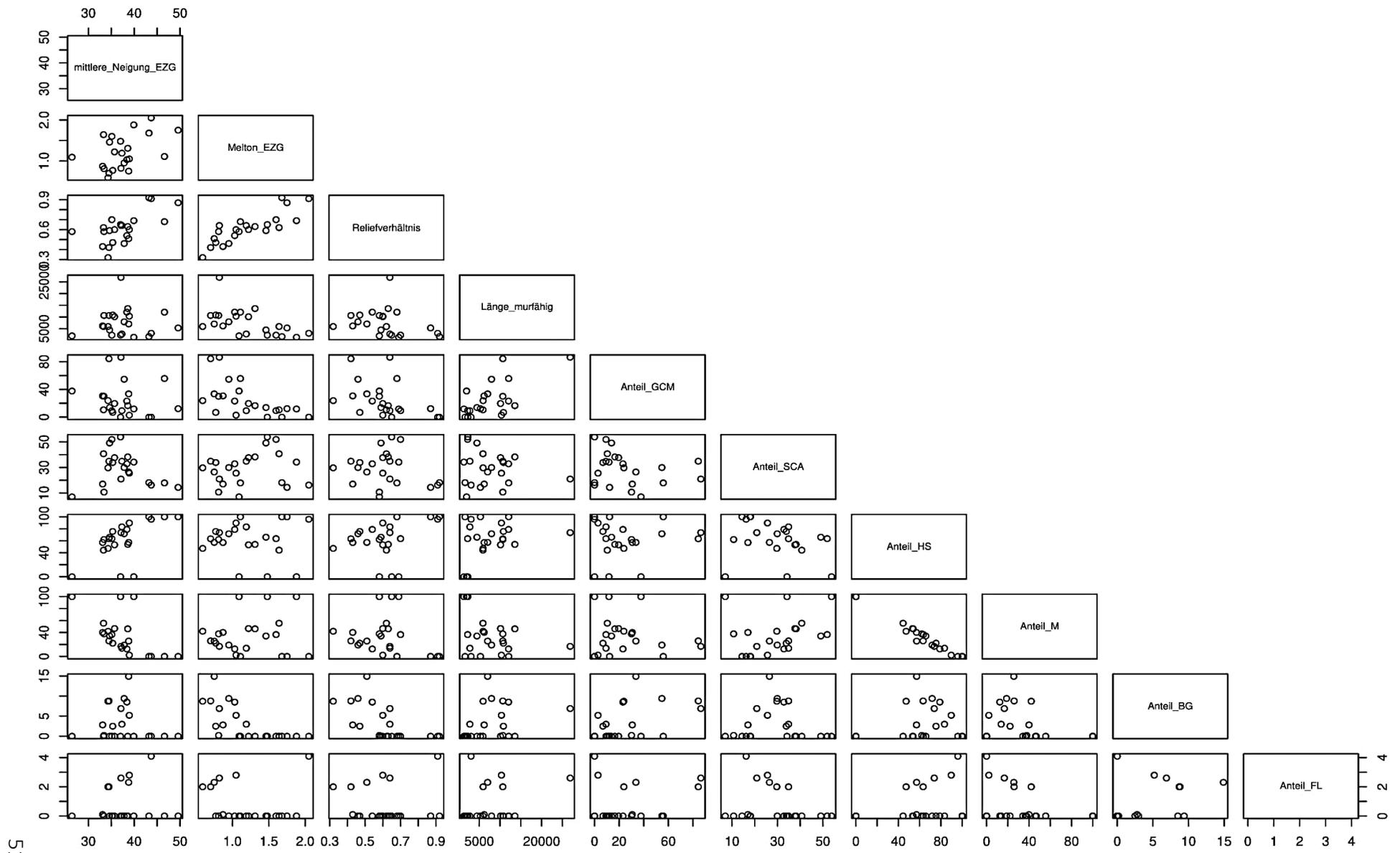


Abbildung 18: Streudiagramm-Matrix der unabhängigen Variablen (geomorphometrische und geologische Parameter)

### 4.3 Vergleich der Geomorphometrie

In *Tabelle 9* sind die Ergebnisse der statistischen Korrelationsanalysen für die morphometrischen Merkmale dargestellt. Außer den Ereignisdaten konnte nur für die Längen des murfähigen Gerinnes keine Normalverteilung nachgewiesen werden, dementsprechend wurde für diese beiden Datensätze das Verfahren nach Spearman verwendet. Nur 4 der insgesamt 16 untersuchten Zusammenhänge weisen p-Werte unter 0,05 auf und können somit als signifikant bezeichnet werden. Abgesehen davon sind deutliche Schwankungen in der Stärke der Zusammenhänge erkennbar. Nachstehend wird auf die Ergebnisse im Einzelnen näher eingegangen. Für ausgewählte Zusammenhänge sind zudem die zugehörigen Streudiagramme dargestellt.

*Tabelle 9: Ergebnisse der statistischen Korrelationsanalysen für die morphometrischen Parameter. Für jeden untersuchten Zusammenhang ist das verwendete Testverfahren, der entsprechende Korrelationskoeffizient  $\rho$  und die Signifikanz (p-Wert) angegeben. Signifikante Zusammenhänge ( $p < 0,05$ ) sind gelb hinterlegt.*

		mittlere Neigung	Melton-Zahl	Reliefverhältnis	Länge murfähiges Gerinne
Anzahl Ereignisse	Test	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman
	Koeffizient ( $\rho$ )	0,171	0,247	0,312	-0,026
	Signifikanz (p-Wert)	0,435	0,256	0,147	0,905
mittlere Neigung (Kegel)	Test	Br.-Pearson	Br.-Pearson	Br.-Pearson	Spearman
	Koeffizient ( $\rho$ )	0,017	0,474	0,388	-0,604
	Signifikanz (p-Wert)	0,939	0,022	0,067	0,002
Kegelfläche	Test	Br.-Pearson	Br.-Pearson	Br.-Pearson	Spearman
	Koeffizient ( $\rho$ )	0,362	-0,213	-0,003	0,285
	Signifikanz (p-Wert)	0,089	0,329	0,991	0,188
Melton-Zahl (Kegel)	Test	Br.-Pearson	Br.-Pearson	Br.-Pearson	Spearman
	Koeffizient ( $\rho$ )	0,061	0,424	0,246	-0,728
	Signifikanz (p-Wert)	0,783	0,044	0,257	< 0,0001

#### 4.3.1 Mittlere Neigung

Für den Parameter „mittlere Neigung“ konnten keine signifikanten Zusammenhänge nachgewiesen werden. Beim Vergleich mit der Ereignisanzahl, der mittleren Kegelneigung und der Melton-Zahl des Kegels ergibt sich jeweils eine nach Viles (2020) als „sehr schwach“ einzustufende Korrelation ( $\rho \leq 0,2$ ). Nur der Zusammenhang zwischen der mittleren Neigung und der Kegelfläche zeigt mit einem Bravais-Pearson-Koeffizienten von 0,362 zumindest eine schwache Korrelation.

### 4.3.2 Melton-Zahl

Auch die Melton-Zahl weist gegenüber der Ereignisanzahl ( $\rho_{sp} = 0,247$ ) keinen signifikanten Zusammenhang auf. Im Gegensatz dazu ergibt sich hinsichtlich der mittleren Kegelneigung ( $\rho_{br} = 0,474$ ) und der Melton-Zahl des Kegels ( $\rho_{br} = 0,424$ ) jeweils eine signifikante, positiv mittelstarke Korrelation. Zwischen Kegel­fläche und Melton-Zahl besteht wiederum ein gegensinniger, jedoch schwacher, nicht signifikanter Zusammenhang ( $\rho_{br} = -0,213$ ). In *Abbildung 19* und *Abbildung 20* sind die mittlere Kegelneigung und die Kegel-Melton-Zahl in Abhängigkeit der Melton-Zahl des Einzugsgebietes abgebildet. Auffallend sind hierbei die sehr ähnlichen Verteilungsmuster der Einzugsgebietspunkte in den beiden Diagrammen.

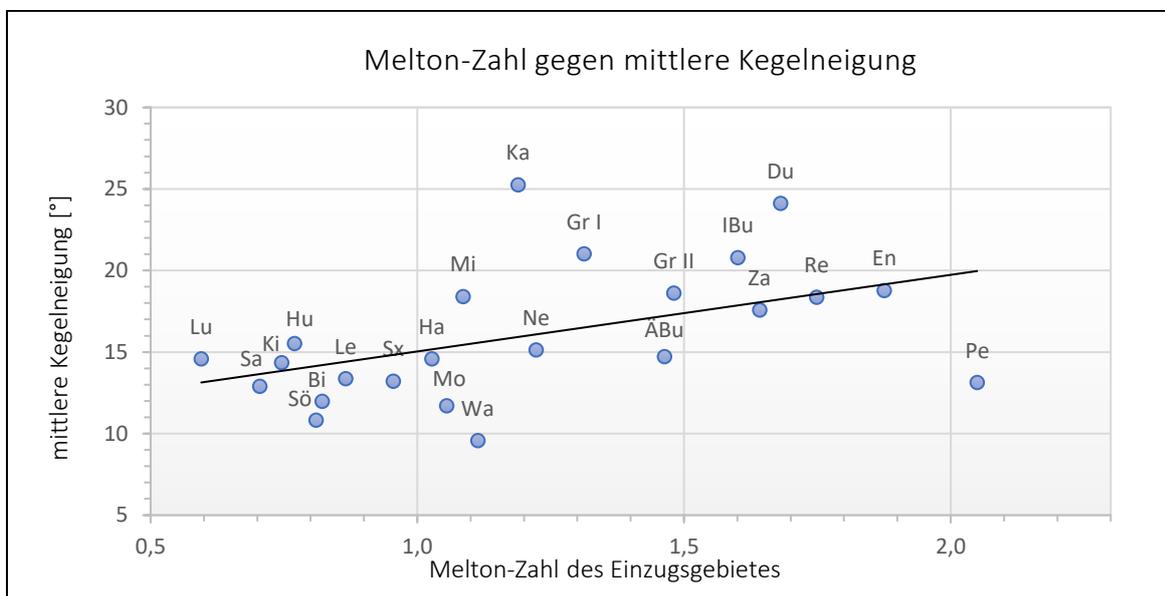


Abbildung 19: Melton-Zahl gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie

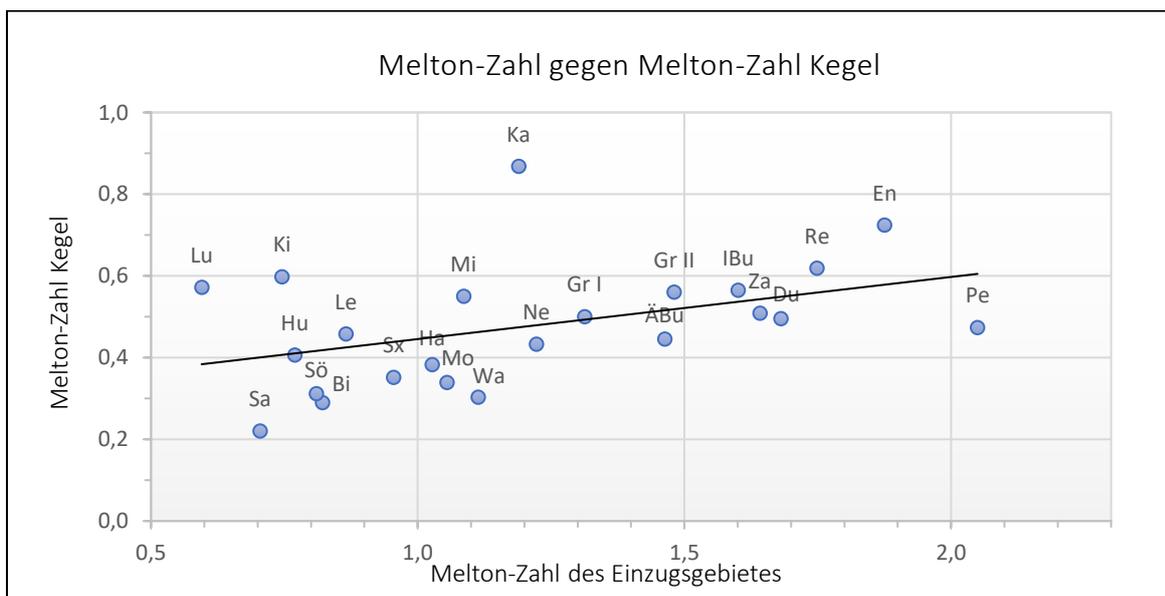


Abbildung 20: Melton-Zahl gegen Melton-Zahl des Kegels mit linearer Trendlinie

### 4.3.3 Reliefverhältnis

Im Falle des Reliefverhältnisses konnten keine signifikanten Zusammenhänge festgestellt werden. Ähnliche Tendenzen wie die Melton-Zahl weist das Reliefverhältnis bezüglich der mittleren Kegelneigung (siehe *Abbildung 21*) und der Melton-Zahl des Kegels auf, wobei die Korrelation mit der mittlere Kegelneigung ( $\rho_{br} = 0,388$ ) nur knapp nicht im signifikanten Bereich liegt ( $p = 0,067$ ). Ein Zusammenhang zwischen Reliefverhältnis und der Kegelfläche besteht nicht ( $\rho_{br} = -0,003$ ).

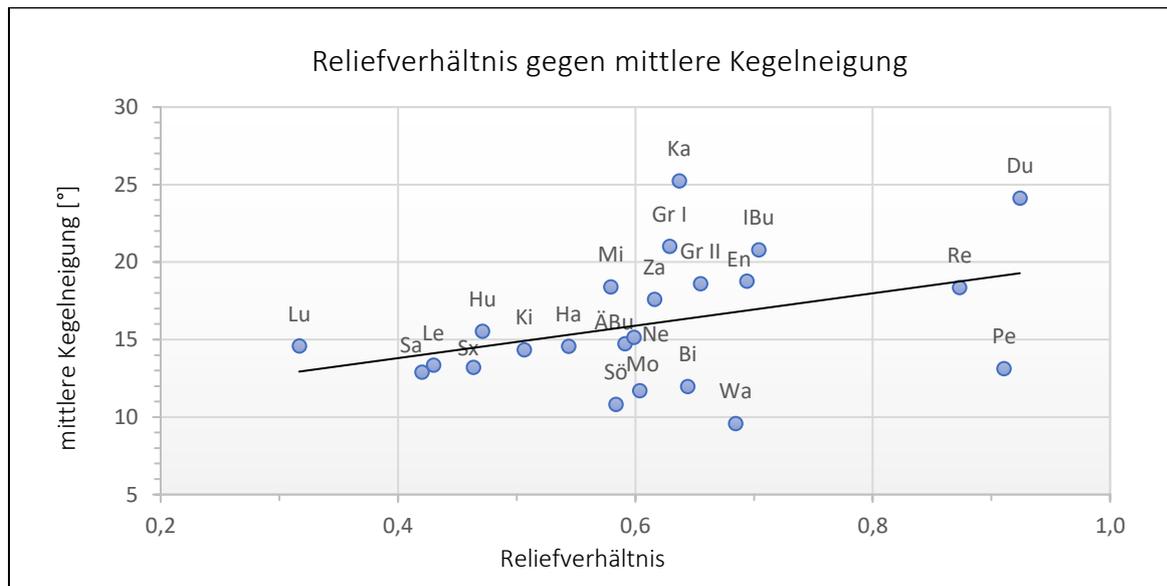


Abbildung 21: Reliefverhältnis gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie

### 4.3.4 Länge des murfähigen Gerinnes

Gegenüber der Anzahl an Ereignissen zeigt die Länge des murfähigen Gerinnes einen eindeutig nicht signifikanten Zusammenhang ( $\rho_{sp} = -0,026$ ). Auffallend sind die vergleichsweise hohen negativen Korrelationswerte hinsichtlich der mittleren Kegelneigung ( $\rho_{sp} = -0,604$ ) sowie der Melton-Zahl des Kegels ( $\rho_{sp} = -0,728$ ). Diese signifikanten Beziehungen weisen als einzige aller untersuchten Zusammenhänge eine starke Korrelation auf. Wie auch in *Abbildung 22* und *Abbildung 23* ersichtlich ist, zeigt sich somit eine Tendenz, wonach die Einzugsgebiete umso steilere und kleinere Ablagerungskegel bilden, je kürzer ihre murfähige Gerinnesdistanz ist. Mit der Kegelfläche besteht wiederum ein schwacher gleichsinniger, nicht signifikanter Zusammenhang ( $\rho_{sp} = 0,285$ ).

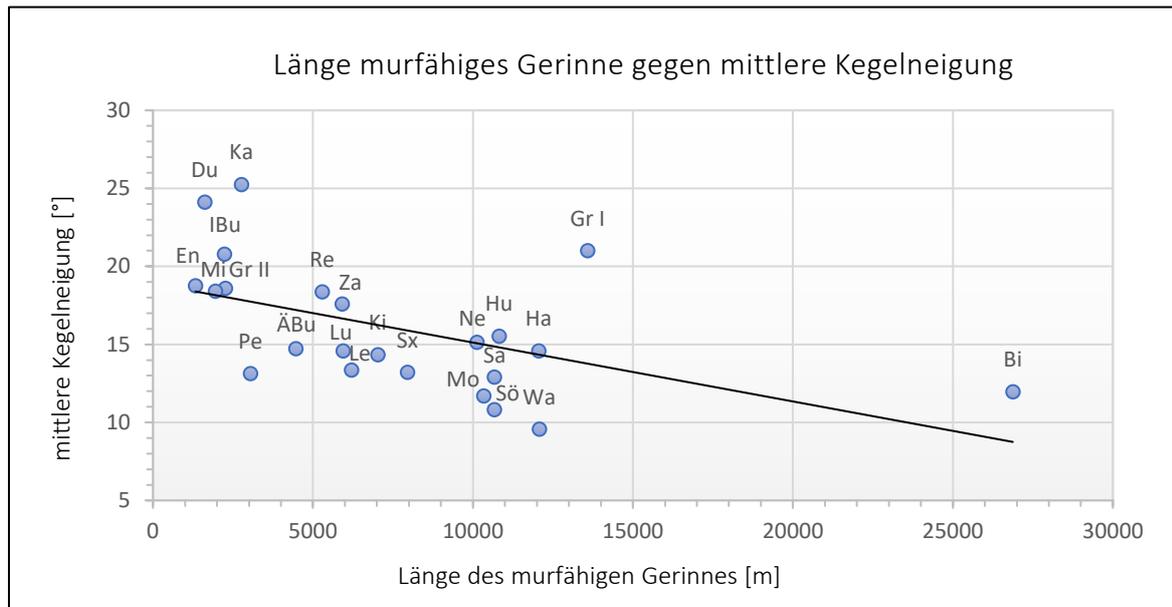


Abbildung 22: Länge des murfähigen Gerinnes gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie

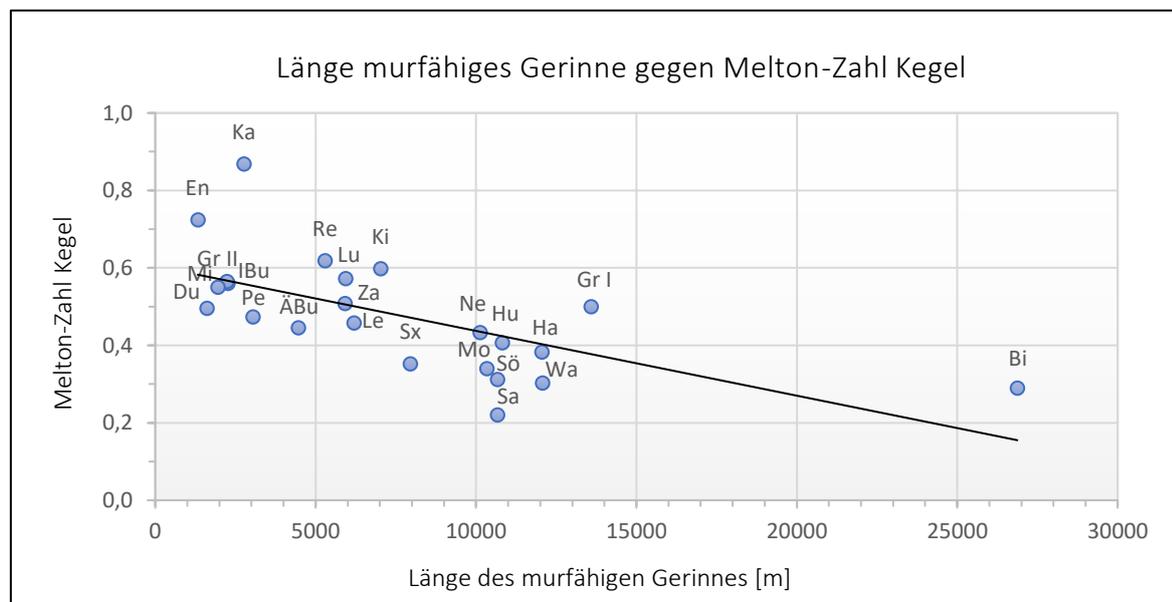


Abbildung 23: Länge des murfähigen Gerinnes gegen Melton-Zahl des Kegels mit linearer Trendlinie

#### 4.4 Vergleich der Geologie

Tabelle 10 zeigt die Ergebnisse der statistischen Korrelationsanalysen für die geologischen Merkmale. Nur für die Zusammenhänge zwischen dem SCA-Anteil und den morphometrischen Kegeldaten erwies sich das Verfahren nach Bravais-Pearson als gültig, für alle anderen Beziehungen wurde aufgrund fehlender Normalverteilung der Rangkoeffizient nach Spearman verwendet. Für 6 der insgesamt 24 untersuchten Beziehungen konnte eine Signifikanz nachgewiesen werden ( $p < 0,05$ ). Wie schon bei den geomorphometrischen Parametern lässt sich eine deutliche Schwankung in der Stärke der Zusammenhänge feststellen. Im Folgenden werden die Zusammenhänge wieder ausführlicher anhand geeigneter Streudiagramme behandelt.

Tabelle 10: Ergebnisse der statistischen Korrelationsanalysen für die geologischen Parameter. Für jeden untersuchten Zusammenhang ist das verwendete Testverfahren, der entsprechende Korrelationskoeffizient  $\rho$  und die Signifikanz (p-Wert) angegeben. Signifikante Zusammenhänge ( $p < 0,05$ ) sind gelb hinterlegt. \*Anteil an der Einzugsgebietsfläche; \*\*Anteil an der SCA je Einzugsgebiet  
HS...Hangschutt, M...Moräne, BG...Blockgletscher, FL...fluviatile/fluvioglaziale Sedimente

		Anteil GCM	Anteil SCA*	Anteil HS**	Anteil M**	Anteil BG**	Anteil FL**
Anzahl Ereignisse	Test	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman
	Koeffizient ( $\rho$ )	-0,127	-0,051	-0,261	0,242	-0,311	-0,062
	Signifikanz (p-Wert)	0,563	0,818	0,229	0,266	0,149	0,780
mittlere Neigung (Kegel)	Test	Spearman	Br.-Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman
	Koeffizient ( $\rho$ )	-0,533	0,304	-0,229	0,307	-0,462	-0,561
	Signifikanz (p-Wert)	0,009	0,158	0,294	0,155	0,026	0,005
Kegelfläche	Test	Spearman	Br.-Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman
	Koeffizient ( $\rho$ )	0,274	-0,338	0,450	-0,51	0,32	0,024
	Signifikanz (p-Wert)	0,207	0,115	0,031	0,013	0,137	0,913
Melton-Zahl (Kegel)	Test	Spearman	Br.-Pearson	Spearman	Spearman	Spearman	Spearman
	Koeffizient ( $\rho$ )	-0,434	0,193	-0,292	0,283	-0,288	-0,22
	Signifikanz (p-Wert)	0,038	0,193	0,176	0,191	0,183	0,314

##### 4.4.1 Anteil der GCM an der Festgesteinsfläche

Der Anteil der Good Clay-Maker-Gesteine (GCM) an der Festgesteinsfläche je Einzugsgebiet korreliert mit der Ereignisanzahl nur sehr schwach ( $\rho_{sp} = -0,127$ ). Gegenüber der mittleren Kegelneigung sowie der Melton-Zahl des Kegels besteht dagegen jeweils ein gegensinniger, signifikanter Zusammenhang im mittleren Stärkebereich ( $\rho_{sp} = -0,533$  bzw.  $\rho_{sp} = -0,434$ ). Wie in *Abbildung 24* und *Abbildung 25* veranschaulicht ist, tendieren demnach Einzugsgebiete, die

einen größeren Anteil an GCM aufweisen, zur Ausbildung von Kegeln mit geringerer Reliefenergie. So zeigen etwa die Einzugsgebiete Wassertalbach, Saxuirerbach, Sagebach und Bichlbach, in denen mehr als 50% der Festgesteinsfläche als GCM eingestuft wurden, mittlere Kegelneigungen von etwa 9° bis 14° sowie Melton-Zahlen zwischen 0,2 und 0,35, wohingegen in den restlichen Einzugsgebieten, bei GCM-Anteilen stets unter 40%, die mittleren Kegelneigungen zwischen ca. 11° und 25° schwanken und die Melton-Zahlen im Bereich von 0,3 bis 0,9 liegen. Mit der Kegelneigung ergibt sich für den Anteil der GCM ein nicht signifikanter, schwach positiver Zusammenhang ( $\rho_{sp} = 0,274$ ).

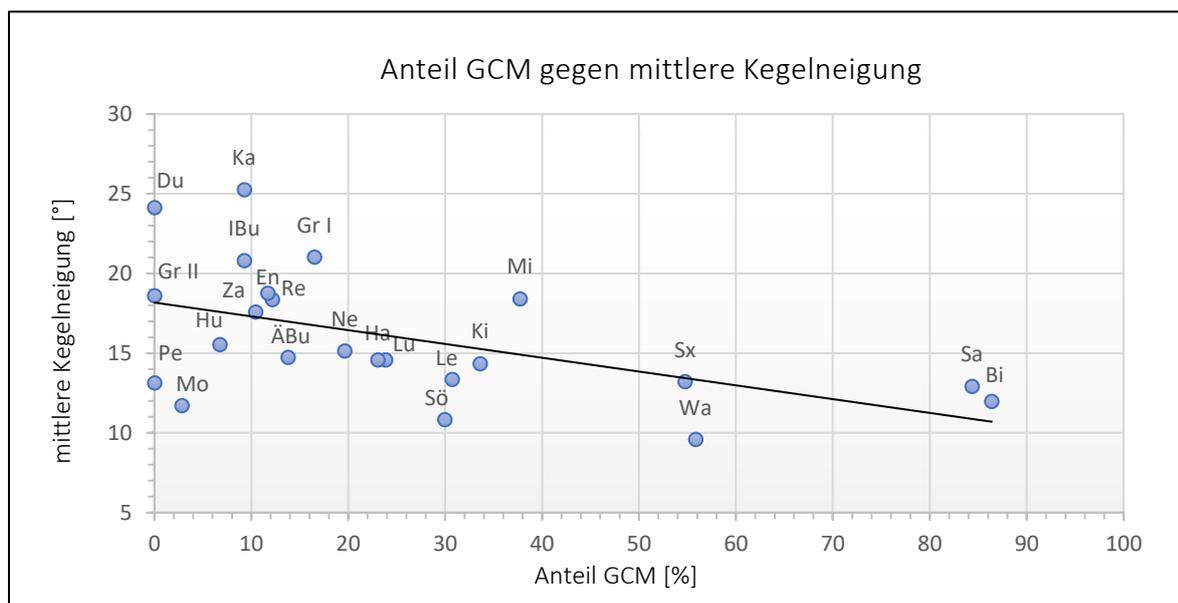


Abbildung 24: Anteil der Good Clay-Maker-Festgesteine an der Festgesteinsfläche gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie

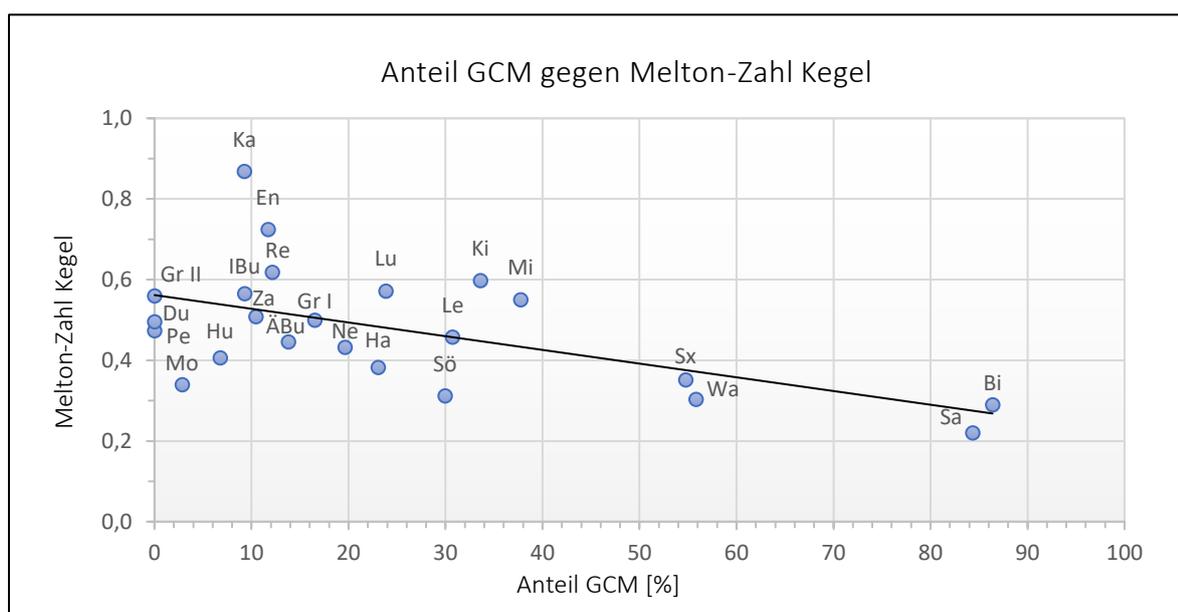


Abbildung 25: Anteil der Good Clay-Maker-Festgesteine an der Festgesteinsfläche gegen Melton-Zahl (Kegel) mit linearer Trendlinie

#### 4.4.2 Anteil der SCA an der Einzugsgebietsfläche

Für den Anteil der Sediment Contributing Area (SCA) an der Einzugsgebietsfläche konnte kein signifikanter Zusammenhang nachgewiesen werden. Gegenüber der mittleren Kegelneigung (siehe *Abbildung 26*) und der Kegelfläche liegt eine schwache Korrelation vor ( $\rho_{br} = 0,304$  bzw.  $\rho_{br} = -0,338$ ), mit der Melton-Zahl (Kegel) besteht nur ein sehr schwacher Zusammenhang ( $\rho_{br} = 0,193$ ). Bezüglich der Richtung der Korrelationen verhält es sich hierbei im Vergleich zum Parameter „Anteil GCM“ genau umgekehrt: Mittlere Kegelneigung und Melton-Zahl (Kegel) zeigen gleichsinnig verlaufende Korrelationen, während die Korrelation mit der Kegelfläche gegensinnig gerichtet ist. Gegenüber der Ereignisanzahl liegt wiederum kein bedeutender Zusammenhang vor ( $\rho_{sp} = -0,051$ ).

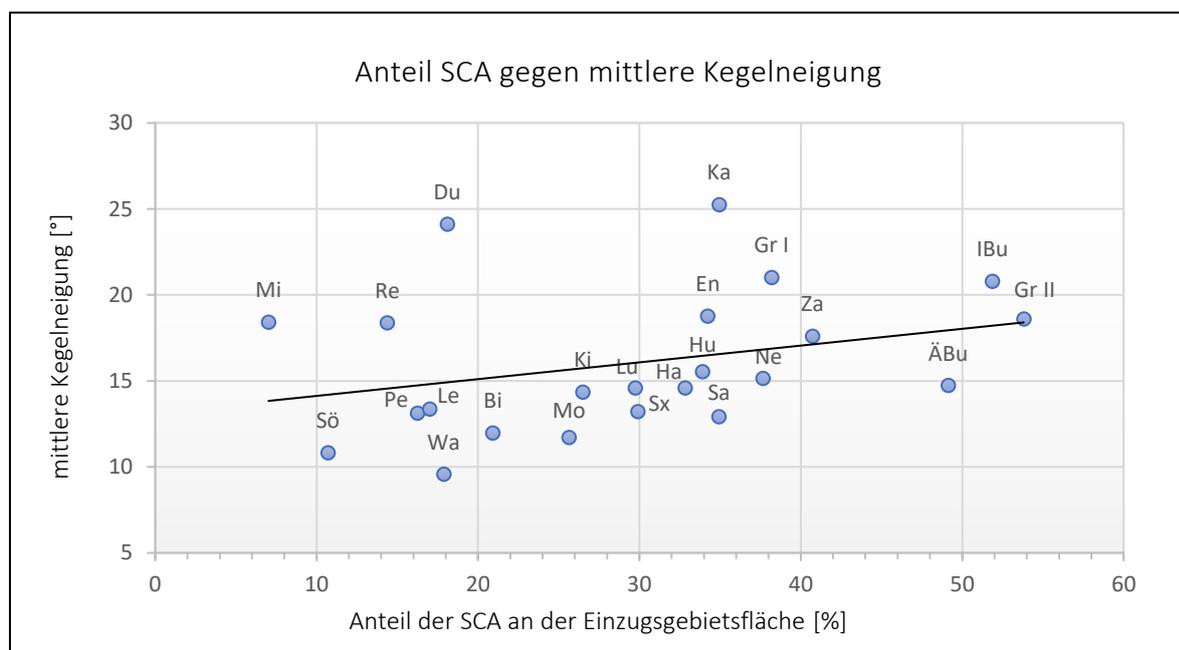


Abbildung 26: Anteil der Sediment Contributing Area an der Einzugsgebietsfläche gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie

#### 4.4.3 Anteile der Lockergesteinstypen an der SCA

Bei den Anteilen der 4 Lockergesteinstypen an der SCA je Einzugsgebiet lässt sich ein gewisses Muster hinsichtlich der Richtung der Korrelationen erkennen. Die Typen Hangschutt, Blockgletscher und fluviatile/fluvioglaziale Sedimente weisen alle mit der Ereignisanzahl, der mittleren Kegelneigung und der Melton-Zahl (Kegel) einen gegensinnigen Zusammenhang auf, gegenüber der Kegelfläche ergibt sich jeweils eine positive Korrelation. Dagegen zeigen sich für den Typ Moräne genau entgegengesetzte Korrelationsrichtungen. Zudem erscheinen die Streuungsmuster für Hangschutt und Moräne beinahe spiegelverkehrt zueinander, wie etwa

im Falle der Kegelfläche in *Abbildung 27* und *Abbildung 28* zu sehen ist. Die Stärke der Zusammenhänge bewegt sich vorwiegend im sehr schwachen bis schwachen Bereich. Signifikante Korrelationen ergeben sich für Hangschutt und Moräne jeweils mit der Kegelfläche ( $\rho_{sp} = 0,450$  bzw.  $\rho_{sp} = -0,510$ ) sowie für Blockgletscher und fluviatile/fluvioglaziale Sedimente mit der mittleren Kegelneigung ( $\rho_{sp} = -0,462$  bzw.  $\rho_{sp} = -0,561$ ).

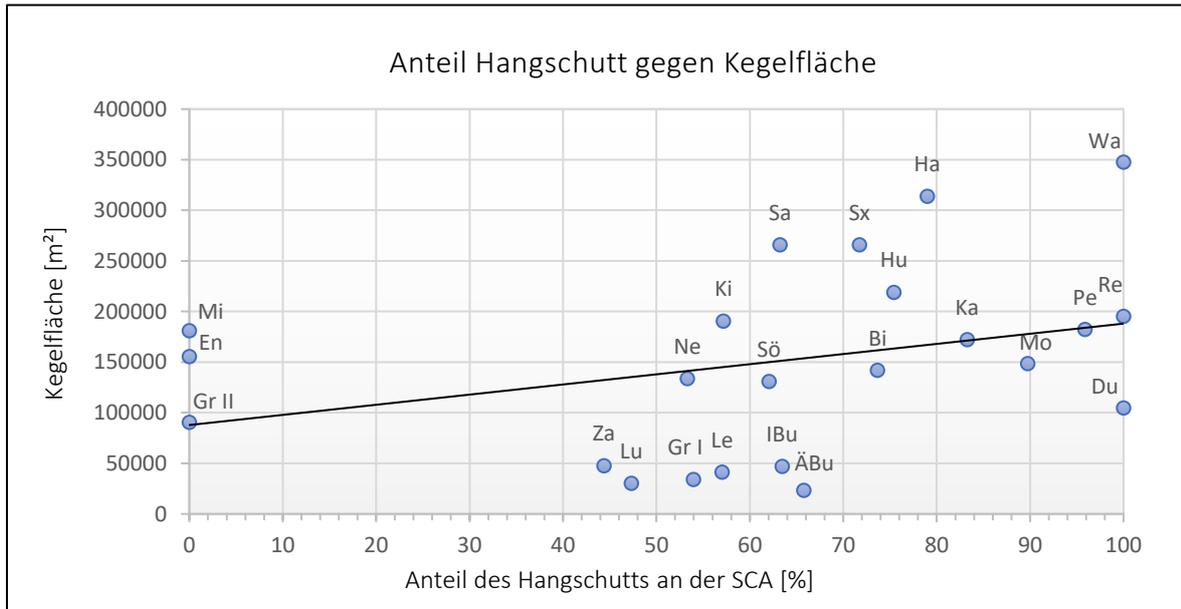


Abbildung 27: Anteil des Hangschutts an der Sediment Contributing Area gegen Kegelfläche mit linearer Trendlinie

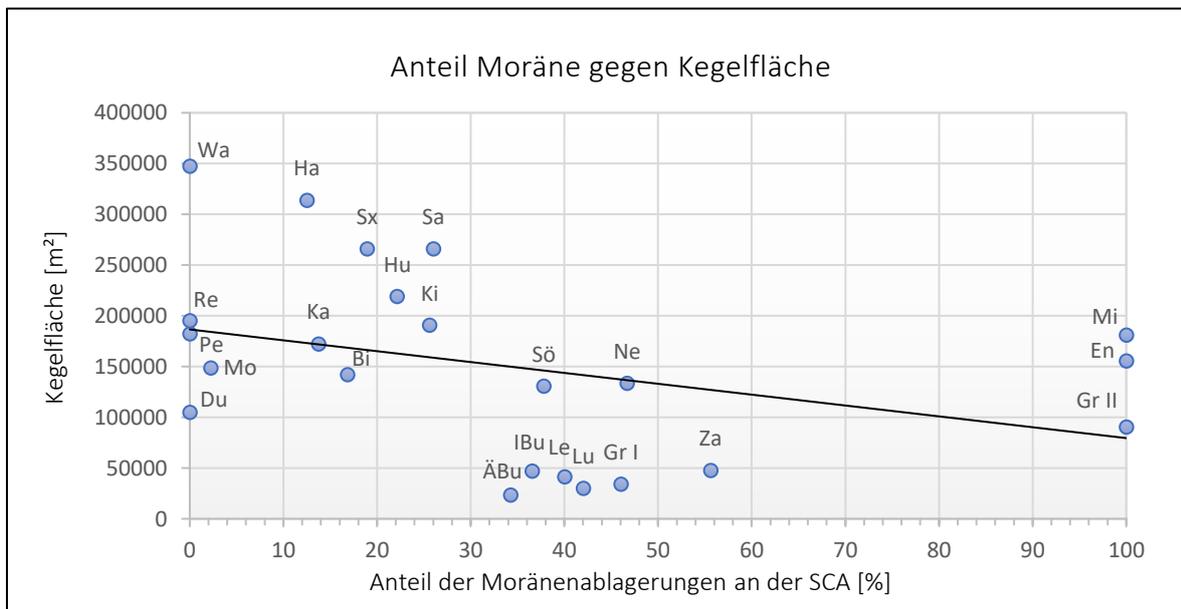


Abbildung 28: Anteil der Moränenablagerungen an der Sediment Contributing Area gegen Kegelfläche mit linearer Trendlinie

## 5 Diskussion

### 5.1 Allgemeines

Wie die statistischen Ergebnisse zeigen, ergab sich für keinen der untersuchten Parameter eine signifikante Korrelation mit der Ereignisanzahl, wohingegen mit den morphometrischen Kegelmerkmalen sehr wohl einzelne signifikante Zusammenhänge bestehen. Dies könnte auf die bereits im Vorfeld angenommene unvollständige Erfassung aller im Untersuchungsgebiet geschehenen Murereignisse zurückzuführen sein. Da im Rahmen der Ereignisdokumentation der WLW vor allem Ereignisse in einem für den Menschen relevanten Schadensausmaß bzw. vorwiegend Ereignisse in den siedlungsreicheren Einzugsgebieten aufgenommen werden, muss davon ausgegangen werden, dass kleinere oder in abgelegeneren Tälern abgegangene Muren zum Teil nicht dokumentiert sind. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass die Ereignisdokumentation erst seit den letzten Jahrzehnten in ihrer jetzigen systematischen Form durchgeführt wird, während Informationen zu den Ereignissen aus den Jahren um und nach 1950 teilweise aus historischen Quellen stammen (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus 2021). Als Beispiel für die Fragwürdigkeit der Ereignisdaten sei das Einzugsgebiet Dunkelrinnerbach zu nennen, welches durch eine äußerst hohe Reliefenergie und einen steil ausgeprägten Kegel auffällt, jedoch kein einziges seit 1950 dokumentiertes Ereignis aufweist. Andererseits mag auch die untersuchte Zeitspanne von 70 Jahren zu kurz sein, um morphometrische und geologische Abhängigkeiten hinsichtlich der Murganghäufigkeit anhand der Ereignisanzahl zu erkennen.

Aus diesen Gründen wird in der weiteren Diskussion der Fokus auf die Korrelationen hinsichtlich der morphometrischen Kegelmerkmale (mittlere Neigung, Kegelfläche, Melton-Zahl) gelegt. Im Gegensatz zur Ereignisanzahl spiegeln diese Parameter das Prozessgeschehen in einem Einzugsgebiet seit Beginn der postglazialen Zeit und somit über einen Zeitraum von ca. 10.000 Jahren wider (Marchi und Tecca 1995). Die Basis für die Interpretation der Korrelationsergebnisse bilden in diesem Fall die bereits beschriebenen Ergebnisse von Kessler (2019), wonach im Pitztal die von murartigen Prozessen (murartiger Feststofftransport, Murgang) geprägten Kegel signifikant höhere Melton-Zahlen und Neigungen sowie signifikant kleinere Flächen aufweisen als die von fluviatilen Prozessen (Hochwasser, fluviatiler Feststofftransport) beeinflussten Kegel.

## 5.2 Vergleich der Geomorphometrie

Bei den morphometrischen Parametern weist einerseits die Melton-Zahl eine positiv signifikante Korrelation gegenüber der mittleren Kegelneigung sowie gegenüber der Melton-Zahl des Kegels auf. Wie in den entsprechenden Streudiagrammen ersichtlich ist, tendieren demnach die steileren und kleineren Einzugsgebiete zur Ausbildung stärker geneigter Kegel mit geringerer Ausdehnung als dies bei den großen, flachen Einzugsgebieten der Fall ist. Dementsprechend besteht auch ein gegensinniger, wenn auch nur schwacher Zusammenhang zwischen der Melton-Zahl (Einzugsgebiet) und der Kegelfläche. Durch Berücksichtigung der Ergebnisse von Kessler (2019) lassen diese Korrelationen darauf schließen, dass mit steigender Melton-Zahl (Einzugsgebiet) zunehmend murartige Prozesse gegenüber den fluviatilen Prozessen in den Einzugsgebieten dominieren. Diese Beobachtung konnte bereits mehrfach in anderen Untersuchungen beschrieben werden. Marchi und Tecca (1995) sowie Jackson et al. (1984) wiesen etwa für ausgewählte Täler in den ostitalienischen Alpen bzw. in den kanadischen Rocky Mountains einen linearen Zusammenhang zwischen der Melton-Zahl des Einzugsgebietes und der Kegelneigung nach, wobei die fluviatil geprägten Kegel aufgrund deutlich geringerer Neigungswerte und niedrigerer Melton-Zahlen der zugehörigen Einzugsgebiete klar von den murartig dominierten Kegeln getrennt werden können. Bardou (2002) weist anhand dieses Zusammenhangs zusätzlich einen Bereich für murartige Feststoffereignisse aus, dessen Kegelneigungs- und Melton-Werte zwischen jenen der fluviatilen Prozesse und Murgänge im eigentlichen Sinn liegen.

Für das Reliefverhältnis ergeben sich zwar dieselben Korrelationsrichtungen wie für die Melton-Zahl, jedoch fallen die Zusammenhänge mit den Kegelmerkmalen schwächer aus und liegen im nicht signifikanten Bereich. Nur die Korrelation mit der Kegelneigung erreicht beinahe ein signifikantes Niveau. Dass Reliefverhältnis und Melton-Zahl die Murgangaktivität grundsätzlich auf ähnliche Weise beeinflussen, zeigt auch der im Streudiagramm erkennbare lineare Zusammenhang zwischen den beiden Parametern (Kollinearität), was darauf hinweist, dass sie zum Teil die gleichen topographischen Informationen enthalten. Der Unterschied in der Korrelationsstärke kann womöglich damit erklärt werden, dass besonders bei breiten Einzugsgebieten, die von mehreren parallelen Bachläufen entwässert werden, das Reliefverhältnis durch Verwendung der Einzugsgebietslänge die tatsächliche, für die Murgangbildung relevante Topographie unzureichender wiedergibt als dies bei der Melton-

Zahl der Fall ist, welche die Einzugsgebietsfläche berücksichtigt. Auch Wilford et al. (2004) sprechen der Melton-Zahl im Vergleich zum Relief-Verhältnis eine bessere Eignung bei der Unterscheidung gerinnebasierter Leitprozesse mittels morphometrischer Einzugsgebietsmerkmale zu.

Bezüglich der mittleren Neigung im Einzugsgebiet kann keine signifikante Abhängigkeit der Kegeldaten beobachtet werden. Dies deutet darauf hin, dass das durchschnittliche Gefälle allein weniger entscheidend für die Anfälligkeit eines Einzugsgebietes gegenüber murartigen Prozessen ist als etwa der flächen- bzw. längenspezifische Höhenunterschied, der in der Berechnung der Melton-Zahl bzw. des Reliefverhältnisses Anwendung findet. So findet man zum Beispiel in den größeren Einzugsgebieten Kitzelesbach oder Morlebach genauso eine mittlere Hangneigung von rund  $40^\circ$  vor wie etwa in den deutlich kleineren Tälern Enzenstallermurbach und Grünbach II.

Die Korrelationen mit der eindeutig höchsten Signifikanz unter den morphometrischen Parametern weist die Länge des murfähigen Gerinnes auf. Hier lässt sich anhand der starken, negativen Zusammenhänge mit Kegelneigung und Kegel-Melton-Zahl eine klare Zunahme des Kegelreliefs mit abnehmender Länge des murfähigen Gerinnes feststellen. Die Gegensinnigkeit ist einerseits dadurch zu erklären, dass die murfähige Gerinnelänge in gewisser Maßen auch die Melton-Zahl der Einzugsgebiete widerspiegelt, wie das entsprechende Streudiagramm dieser beiden Merkmale zu erkennen gibt. Demzufolge weisen die kleinsten und steilsten Täler auch die geringsten murfähigen Gerinnelängen auf, was logisch erscheint. Die hohe Korrelationsstärke ist womöglich darauf zurückzuführen, dass im Gegensatz zu den restlichen morphometrischen Merkmalen, welche sich auf das gesamte Einzugsgebiet beziehen, die Länge des murfähigen Gerinnes das unmittelbar für die Murgangbildung relevante Gelände besser repräsentiert. Oberhalb unüberwindbarer Flachstrecken gelegene Gebiete oder durch Gletscherseen vom Gerinne abgekoppelte Bereiche, die nicht direkt Einfluss auf das Prozessgeschehen haben werden somit ausgeschlossen. Dass diese Ablagerungstrecken besonders in den großen, flachen Einzugsgebieten vorhanden sind, wird deutlich, wenn man die Anteile der murfähigen Gerinnelängen am Gesamtgerinne je Einzugsgebiet in Abhängigkeit der Melton-Zahl (Einzugsgebiet) betrachtet (siehe *Abbildung 29*). Die 9 Einzugsgebiete, in denen das murfähige Gerinne zwischen rund 11% und 80% des Gesamtgerinnes ausmacht, sind zum Großteil auch jene mit den niedrigsten Melton-Werten, während in allen restlichen Tälern

aufgrund des vorwiegend steileren Reliefs das gesamte Gerinne als murfähig ausgewiesen wurde. Trotzdem zeigen die größeren und flacheren Täler tendenziell längere murfähige Gerinnestrecken.

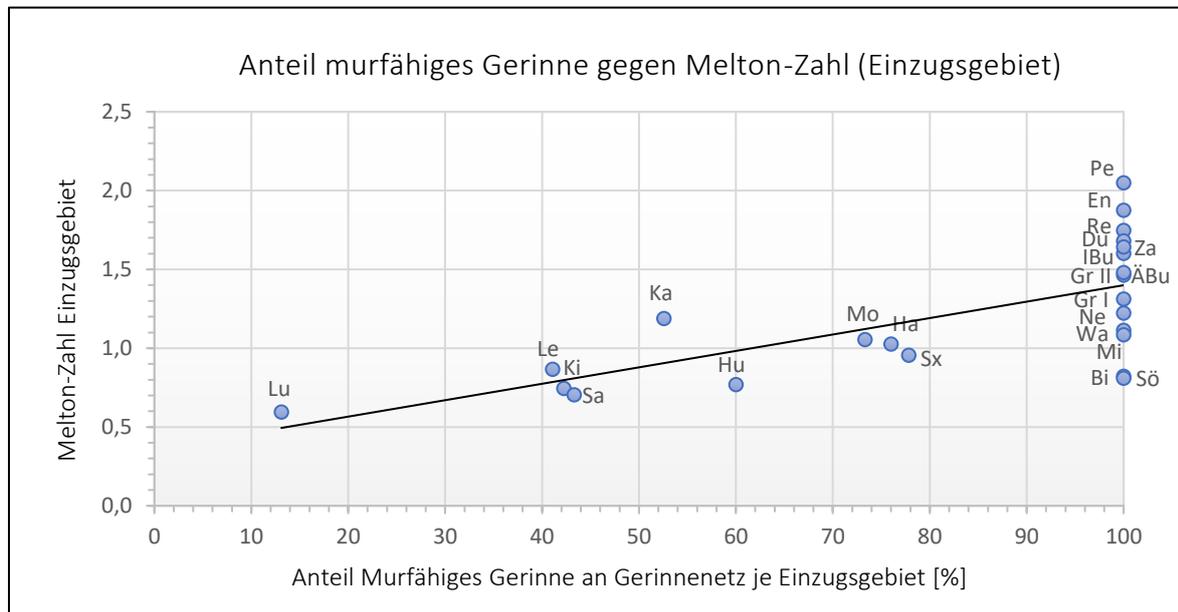


Abbildung 29: Anteil des murfähigen Gerinnes gegen Melton-Zahl des Einzugsgebietes mit linearer Trendlinie

Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass sich die murfähige Gerinnedistanz kumulativ aus den einzelnen Bachläufen in einem Einzugsgebiet zusammensetzt und daher nichts über die Anordnung des Gerinnenetzes aussagt. So fällt auf, dass sich in großen Einzugsgebieten die murfähige Länge aufgrund des breiteren Talverlaufs oft auf mehrere zusammenführende Bachläufe aufteilt, wohingegen in kleineren Einzugsgebieten dieselbe Länge meistens ein längeres, stark eingeschnittenes Hauptgerinne mit nur wenigen Zubringern beschreibt, das vermutlich die besseren Voraussetzungen für murartige Prozesse bietet. Trotz der vorliegenden starken Korrelationsergebnisse ist deshalb eine Bewertung der Murgangaktivität rein auf Basis der murfähigen Gerinnelänge fragwürdig. Dementsprechend werden in der Fachliteratur vermehrt Kombinationen aus morphometrischen Parametern zur Identifizierung von Leitprozessen in einem Einzugsgebiet empfohlen. Laut Wilford et al. (2004) eignet sich die Kombination aus Gerinnelänge und Meltonzahl am besten, wobei sie als Grenzwerte für das Auftreten von Muren eine Melton-Zahl von  $>0,6$  sowie eine Gerinnelänge von  $<2,7$  km angeben.

### 5.3 Vergleich der Geologie

Bezüglich des Einflusses der unterschiedlichen Verwitterungsresistenz der Festgesteine auf die Ereignishäufigkeit konnten die von Tiranti et al. (2014) dargelegten Ergebnisse, wonach die von Good Clay-Maker-Gesteinen dominierten Einzugsgebiete eine deutlich höhere mittlere Murgangfrequenz gegenüber den von Bad Clay-Maker-Lithologien beherrschten Tälern aufweisen, nicht bestätigt werden. Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Anteil an GCM-Gesteinen im Einzugsgebiet und der Ereignisanzahl, was vermutlich zum Teil der bereits erwähnten unzureichenden Ereigniserfassung im Untersuchungsgebiet geschuldet ist. Auf der anderen Seite darf nicht vergessen werden, dass Tiranti et al. (2014) in ihren Untersuchungen eine weitaus größere Anzahl an Einzugsgebieten heranzogen (insgesamt 2100), die durch ihre Verteilung über die gesamte Piemont-Region auch eine größere Bandbreite an verschiedenen Lithologien abdecken (neben hauptsächlich metamorphen Gesteinen kommen auch als GCM eingestufte Kalke und Dolomite vor).

Im Gegensatz dazu verhält sich der Anteil an GCM zur mittleren Kegelneigung und zur Melton-Zahl des Kegels jeweils in einem signifikanten, gegensinnigen Zusammenhang (mittlere Korrelationsstärke). In Bezug auf die Ergebnisse von Kessler (2019) würde dies bedeuten, dass mit zunehmendem Vorkommen an verwitterungsanfälligeren Festgesteinen das Auftreten murartiger Prozesse im Verhältnis zu fluviatilen Prozessen im Einzugsgebiet abnimmt, was nicht plausibel erscheint. Stattdessen könnte eine Erklärung für diese Zusammenhänge im unterschiedlichen Ablagerungsverhalten des Murmaterials in Abhängigkeit des Ausgangsgesteins liegen. So stellten auch Tiranti und Deangeli (2015) im Durchschnitt kleinere mittlere Kegelneigungen und größere Kegelflächen für die GCM-Einzugsgebiete gegenüber den BCM-Einzugsgebieten fest und führen dies auf die unterschiedliche Rheologie der Prozesse in den beiden Einzugsgebietstypen zurück. Demzufolge zeigen die Murgänge in den GCM-Einzugsgebieten aufgrund des höheren Feinanteils ein eher viskoplastisches Fließverhalten, das zu einem stärkeren „Ausfließen“ des Materials am Ablagerungskegel führt, während in den BCM-Einzugsgebieten die Ablagerung des hauptsächlich groben Materials (sehr wenig tonartige Feinstoffe) in Form einer gravitativen Selektion stattfindet (Tiranti und Deangeli 2015; Tiranti 2016). Überdies sei der wesentliche Umstand zu beachten, dass eine erkennbare negative Korrelation zwischen den unabhängigen Parametern „Anteil GCM“ und „Melton-Zahl (Einzugsgebiet)“ besteht. Da also Einzugsgebiete mit kleinen Melton-Zahlen tendenziell ein

größeres Vorkommen an GCM aufweisen, überlagert der Einfluss der Topographie eventuell die soeben diskutierten Zusammenhänge zusätzlich, weshalb deren Aussagekraft zu hinterfragen ist.

Der Anteil der Sediment Contributing Area (SCA) im Einzugsgebiet weist gegenüber den Kegelausprägungen zunächst keine Korrelationen im signifikanten Ausmaß auf. Die entsprechenden Korrelationen deuten zwar im Richtungsverlauf auf ein häufigeres Auftreten von murartigen Prozessen mit steigendem SCA-Anteil hin, allerdings gehen diese nicht über den schwachen Stärkebereich hinaus. Bei genauerer Betrachtung des Streudiagramms mit der mittleren Kegelneigung können vor allem die Einzugsgebiete Dunkelrinnerbach, Mitterbach und Reiselebach, welche trotz geschieberelevanter Anteile von nur ca. 7% bis 18% mittlere Kegelneigungen von mehr als 18° aufweisen, als deutliche Ausreißer ausgemacht werden. Interessant ist, dass sich bei Nichtberücksichtigung dieser drei Täler sehr wohl eine signifikante und sogar starke Korrelation mit der Kegelneigung ( $\rho_{br} = 0,65$ , p-Wert = 0,002) ergeben würde, was auch die Erkenntnisse aus ähnlichen Untersuchungen widerspiegelt. Beispielsweise nennen Hürlimann et al. (2016) neben morphometrischen Parametern wie der Melton-Zahl den prozentuellen Schuttanteil in einem Einzugsgebiet als einen der entscheidendsten Faktoren in der Bewertung der Suszeptibilität gegenüber Muren.

Die starke Kegelausprägung bei vergleichsweise kleiner SCA im Falle der drei oben genannten Einzugsgebiete könnte dadurch erklärt werden, dass hier neben den ausgewiesenen sedimentpendenden Flächen möglicherweise auch tektonische Prozesse eine Rolle in der Geschiebebereitstellung spielen. Vor allem lassen die tief eingeschnittenen Hauptgerinne einen zumindest teilweisen Verlauf entlang von Störungslinien vermuten. Infolge von Bewegungsvorgängen in Störzonen kann es durch starke mechanische Beanspruchung des Gesteins (Fragmentierung) zur Bildung großer Mengen von nicht bindigem Lockermaterial (sogenannter Kakirit) kommen, welches eine potenzielle Geschiebequelle für Muren darstellt (Engl et al. 2008; Heitzmann 1985). Es soll außerdem nochmals in Erinnerung gerufen werden, dass die SCA nur das Flächenausmaß der Lockergesteinsvorkommen definiert und somit deren Mächtigkeiten nicht berücksichtigt. Interessanterweise kann kein positiver Zusammenhang zwischen dem Vorkommen an GCM und dem Anteil an SCA in den Einzugsgebieten beobachtet werden, d.h. mit zunehmendem Auftreten verwitterungsanfälligerer Festgesteine ist nicht unbedingt mehr geschieberelevantes Lockermaterial vorhanden.

Welchen Einfluss die Art der in der SCA enthaltenen Lockergesteine auf das Auftreten murartiger Ereignisse hat, muss in erster Linie auf Basis der Korrelationsergebnisse für die Parameter „Anteil Hangschutt“ und „Anteil Moräne“ gedeutet werden. Aufgrund der Tatsache, dass Blockgletscher und fluviatile/fluvioglaziale Sedimente nur in den wenigsten Einzugsgebieten in der geschieberelevanten Fläche vertreten sind und selbst da nur wenige Prozent ausmachen, erweist sich eine Interpretation anhand der entsprechenden Korrelationen als nicht sinnvoll. Vielmehr ist davon auszugehen, dass die signifikanten Zusammenhänge für diese beiden Parameter per Zufall zustande kommen. Daraus erklärt sich auch die hohe negative Kollinearität zwischen den Typen Hangschutt und Moräne und ihre gegensätzliche Wirkung auf die Kegelbildung. Während sich mit steigendem Anteil des Hangschutts an der SCA die Formung größerer und flacherer Kegel und somit eine Tendenz in Richtung stärkeren fluviatilen Prozessgeschehens andeutet, verhält es sich im Fall des Moränenanteils genau umgekehrt.

Womöglich spielen hier neben Differenzen in den sedimentologischen Eigenschaften (z.B. Ablagerungsform, Kornzusammensetzung, Dichte) zwischen den beiden Lockergesteinstypen auch Unterschiede in der Mächtigkeit sowie der Lage zum Hauptgerinne eine wesentliche Rolle. So fällt auf, dass die Moränenablagerungen vorwiegend in den zentralen Talbereichen zu finden sind, wo es durch das Einschneiden größerer Gerinne in die teils mächtigen Ablagerungen zur Ausbildung steiler Feilenanbrüche kommt. Im Vergleich dazu erscheinen die hauptsächlich in den Taleinhängen gelegenen Hangschutthalden oft geringmächtiger und eher von oberflächlichen Erosionsprozessen geprägt. Da allerdings in beiden Fällen nur gegenüber der Kegelfläche das Signifikanzniveau erreicht wird (mittelstarke Korrelation), scheint die Art des zu Verfügung stehenden Lockermaterials eine im Vergleich zu anderen Parametern deutlich geringere Rolle bezüglich der Murgangaktivität zu spielen. Zudem könnten auch hier die Differenzen in der Kegelmorphologie mehr auf unterschiedliche rheologische Eigenschaften der Lockergesteinstypen als auf die dominierende Prozessart zurückzuführen sein.

#### 5.4 Einteilung nach dem Konzept von Stiny (1931)

Die weiterführende Frage, ob anhand der gewonnenen Erkenntnisse die untersuchten Einzugsgebiete nach dem Konzept von Stiny (1931) als Jungschuttwildbäche oder Altschuttwildbäche klassifiziert werden können, wird auf Basis der kartierten Lockergesteinsflächen beantwortet. Hierzu werden in vereinfachter Weise die Typen Moräne und Blockgletscher als Altschutt eingestuft, während die fluviatilen/fluvioglazialen Sedimente dem Jungschutt zugeordnet werden. Beim Typ Hangschutt ist dagegen die Zuweisung nicht eindeutig. Nimmt man an, dass dieser zur Gänze dem Jungschutt zugerechnet werden kann, ergibt sich für den Altschutt durchschnittlich ein Anteil von 36,9% an der geschieberelevanten Fläche, wohingegen der Jungschutt im Mittel 63,1% der sedimentpendenden Fläche ausmacht. Es ist allerdings zu beachten, dass nach Stiny (1931) nur derjenige Hangschutt als Jungschutt zu bezeichnen ist, welcher infolge kontinuierlicher Verwitterungsvorgänge ständig neu produziert wird (= rezenter Verwitterungsschutt). Die mächtigeren glazial geprägten, meistens von Vegetation bedeckten Schuttkegel (= fossiler Hangschutt) fallen dagegen in die Gruppe des Altschutts. Einer groben Schätzung zufolge können nach dieser Unterscheidung etwa zwei Drittel des Hangschutts im Untersuchungsgebiet als Altschutt ausgewiesen werden. Aufgrund dieser Tatsache und des ohnehin stark glazial geprägten Erscheinens der meisten Einzugsgebiete kommt man zum Schluss, dass es sich bei den untersuchten Einzugsgebieten überwiegend um Altschuttwildbäche handelt. Als wenige Ausnahmen sind die Täler Dunkelrinnerbach, Wassertalbach, Perlekarbach und Reiselebach zu nennen, welche angesichts ihrer geringmächtigeren, großteils vegetationslosen Hangschuttherde sowie wegen des Fehlens glazialer Talverfüllungen als Jungschuttwildbäche klassifiziert werden können.

Das von Stiny (1931) beobachtete Muster bezüglich der zeitlichen Ereignisaktivität, wonach in Jungschuttwildbächen die Murgänge aufgrund der nötigen Regenerationsperioden der Geschiebeherde regelmäßiger auftreten als jene in den Altschuttwildbächen, kann anhand der soeben genannten Unterteilung zumindest für einzelne Einzugsgebiete bestätigt werden. Während beispielsweise der als Jungschuttwildbach eingestufte Reiselebach eine halbwegs regelmäßige Ereignisabfolge aufweist, finden in den Einzugsgebieten Mitterbach, Enzenstallermurbach und Grünbach II, deren geschieberelevante Flächen zur Gänze aus Moräne (Altschutt) zusammengesetzt sind, die Ereignisse in deutlich unregelmäßigeren Abständen statt (siehe *Abbildung 30*). Dass im Falle der Altschuttwildbäche der Großteil der

Murgänge sogar in einem Zeitraum von nur 1 bis 2 Jahren auftritt, kann womöglich auf die entstandenen Feilenanbrüche zurückgeführt werden, die ab ihrer „Öffnung“ in den mächtigen Ablagerungen zu einer zunehmenden Destabilisierung des Hanges führen und somit die Anfälligkeit gegenüber nachfolgenden Ereignissen an dieser Stelle erhöhen (Luzian et al. 2002). Zusätzlich ist anzumerken, dass es sich beim Reiselebach im Gegensatz zu den drei anderen Bächen um ein sehr gut untersuchtes Gerinne handelt. Hinsichtlich der Größe der Ereignisse können keine auffallenden Unterschiede zwischen den beiden Wildbachtypen festgestellt werden. Es sei in diesem Zusammenhang jedoch auch an die zweifelhafte Aussagekraft der Ereignisdaten erinnert.

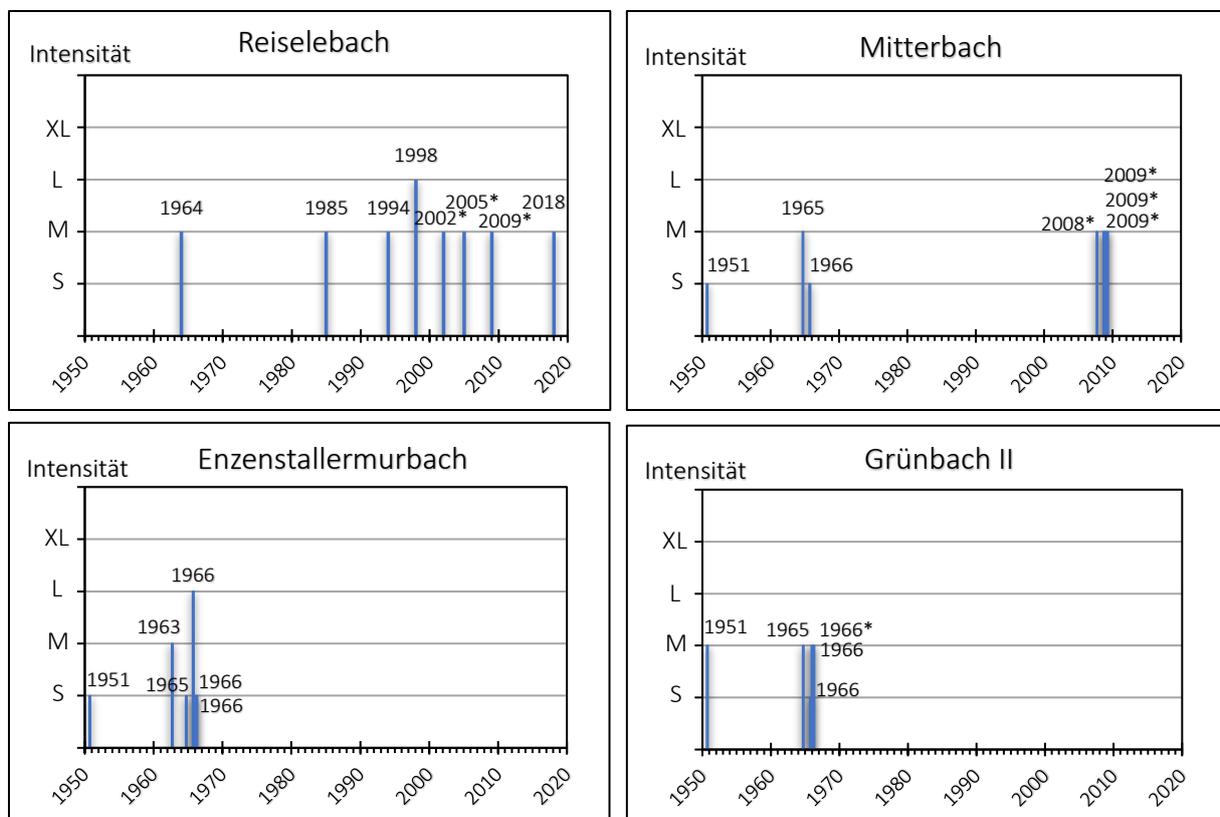


Abbildung 30: Darstellung der zeitlichen Abfolge der Murgangereignisse laut Ereignisdokumentation der WLV. Im Falle des Reiselebachs wurden zusätzlich drei Ereignisse (2002, 2005, 2009) aus der Publikation von Kogelnig-Mayer et al. (2011) hinzugefügt. Der als Jungschuttwildbach eingestufte Reiselebach weist eine regelmäßige Ereignisabfolge auf als die Einzugsgebiete Mitterbach, Enzenstallermurbach und Grünbach II, welche den Altschuttwildbächen zugeordnet wurden.

Intensitäten: XL = extrem, L = stark, M = mittel, S = gering, \*Intensität unbekannt

## 5.5 Datenqualität

Einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der statistischen Analysen stellt die Qualität der verwendeten Daten dar. Während die morphometrischen Einzugsgebietsparameter (Melton-Zahl, Reliefverhältnis, mittlere Neigung) relativ genau und einheitlich auf Basis der Einzugsgebietspolygone und des hochauflösenden digitalen Geländemodells berechnet werden können, spielt bei der Kartierung der geologischen Einheiten (Fest- und Lockergesteine) und Ablagerungskegel mithilfe der Fernerkundungsdaten häufig die persönliche Einschätzung des Bearbeiters eine entscheidende Rolle. Besonders war bei der Aufnahme der Lockergesteinsflächen die Abgrenzung zwischen den verschiedenen Typen (v.a. zwischen Hangschutt und Moräne) nicht immer eindeutig. Ebenso beruht die Ausweisung des möglichst realitätsgetreuen Gerinnesystems, welches für die Modellierung der SCA und die Ermittlung der murfähigen Gerinnelängen verwendet wurde, wesentlich auf der Subjektivität des Bearbeiters. Aus diesem Grund sind gewisse Unsicherheiten in der Erfassung der besagten Daten bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Während die Qualität der verwendeten Ereignisdaten bereits näher behandelt wurde, ist hinsichtlich der morphometrischen Kegelmerkmale zu erwähnen, dass etwaige Schutz- und Siedlungsbauten (z.B. Auffang- und Ablenkdamme) am Kegel und/oder die gegenseitige seitliche Begrenzung der Kegelflächen (zusammengewachsene Kegel) zu einer verzerrten Darstellung der natürlichen Kegelmorphologie führen können. Dies dürfte mehr noch die Parameter „Kegelfläche“ und „Melton-Zahl (Kegel)“ betreffen, da man im Falle der mittleren Kegelneigung durch Glättung der Geländeoberfläche mit Hilfe des gröberen DGMs (50 x 50 m) zu einem gewissen Grad entgegenwirken konnte. Zudem ist zu beachten, dass bei den meisten Kegeln die Abtragung des Kegelfußes durch den Vorfluter eine weitere Ausdehnung am distalen Ende verhindert.

Für die Ermittlung der SCA ist neben der genauen Gerinnemodellierung die Festlegung geeigneter Ausscheidungskriterien entscheidend. Die von Heinemann et al. (1998) übernommene Grenzwerte scheinen besonders bei den Hauptgerinnen sehr passend gewählt zu sein, bei den kleineren Zubringer wirkt jedoch das Kriterium der Maximaldistanz (250m) teilweise etwas zu hoch angesetzt. Hier würde statt der Verwendung von Standardwerten eine Anpassung der Ausscheidungskriterien an verschiedene Gerinnegrößen bessere Ergebnisse liefern. Auf der anderen Seite könnte darunter auch die Objektivität in der Durchführung leiden.

## 6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Aufbauend auf einer GIS-basierten Kartierung der Fest- und Lockergesteine wurden für 23 Einzugsgebiete im Pitztal ausgewählte geomorphometrische und geologische Parameter erhoben und anschließend deren Einfluss auf die Murgangaktivität anhand von Korrelationen mit der Ereignisanzahl je Einzugsgebiet und morphometrischen Kegelmerkmalen gedeutet. Im Gegensatz zu den Vergleichen mit den Kegelmerkmalen konnten gegenüber der Ereignisanzahl keinerlei signifikante Zusammenhänge nachgewiesen werden.

Bezüglich des Einflusses der Geomorphometrie auf die Murgangaktivität (Fragestellung 1a) konnte festgestellt werden, dass die Parameter Melton-Zahl und die Länge des murfähigen Gerinnes signifikante Korrelationen mit der mittleren Kegelneigung und der Melton-Zahl des Kegels aufweisen. Je größer die Reliefenergie des Einzugsgebietes bzw. je kürzer die murfähige Gerinnelänge ist, umso steiler und kleiner sind die zugehörigen Kegel ausgeprägt, was wiederum auf eine Zunahme im Auftreten murartiger Prozesse gegenüber jenem der fluviatilen Prozesse im Einzugsgebiet schließen lässt. Für die Parameter „mittlere Neigung“ und „Reliefverhältnis“ ergeben sich keine signifikanten Korrelationen.

In der Frage um die Auswirkung der Verwitterungstendenz der Festgesteine auf die Ereignishäufigkeit (Fragestellung 1b) zeigt sich, dass mit steigendem Vorkommen an verwitterungsanfälligeren Gesteinen (Good Clay-Maker) im Einzugsgebiet die mittlere Kegelneigung und die Kegel-Melton-Zahl signifikant abnehmen. Da diese Abnahme des Kegelreliefs den Erkenntnissen von Kessler (2019) zufolge einem abnehmenden Auftreten murartiger Prozesse entsprechen würde, werden hier die Unterschiede in der Kegelausprägung vielmehr auf verschiedene Ablagerungsverhalten infolge unterschiedlicher Fließverhalten der zwei Festgesteinsklassen als auf die Ereignishäufigkeit zurückgeführt. Da zudem eine negative Korrelation zwischen dem Anteil an GCM und der Melton-Zahl (Einzugsgebiet) besteht, ist von einer gewissen Überlagerung der Zusammenhänge durch topographische Einflüsse auszugehen.

Die Untersuchung der Kegelmorphologien in Abhängigkeit der Größe der nach dem Verfahren von Heinemann et al. (1998) ermittelten geschieberelevanten Fläche je Einzugsgebiet (Fragestellung 1c) ergab bei Berücksichtigung aller Einzugsgebiete keine signifikanten Zusammenhänge. Bei Ausschluss dreier deutlichen Ausreißer unter den Einzugsgebieten ist

sehr wohl eine signifikante, sogar starke Zunahme der mittleren Kegelneigung mit steigendem SCA-Anteil an der Einzugsgebietsfläche feststellbar, was gemäß Kessler (2019) auf ein zunehmendes Auftreten von murartigen Prozessen im Einzugsgebiet hindeutet und mit Beobachtungen in der Fachliteratur übereinstimmt.

Der Vergleich der vier Lockergesteinstypen hinsichtlich ihres Einflusses auf die Murgangaktivität (Fragestellung 1d) wurde nur anhand der Typen Hangschutt und Moräne vorgenommen, da im Falle der Typen Blockgletscher und fluviatile/fluvioglaziale Sedimente die Ableitung kausaler Zusammenhänge aufgrund der äußerst geringen Anteile an der SCA mit großer Unsicherheit verbunden ist. Mit zunehmendem Moränenanteil bzw. abnehmendem Anteil an Hangschutt an der SCA zeichnet sich die Ausbildung tendenziell steilerer und kleinerer Kegel ab, ein signifikanter Zusammenhang ist allerdings jeweils nur gegenüber der Kegelfläche gegeben. Aus diesem Grund wird dem Einfluss der verschiedenen Lockergesteinstypen auf das Prozessgeschehen eine geringe Bedeutung zugeschrieben.

Die Unterteilung der Einzugsgebiete nach dem Konzept von Stiny (1931) (Fragestellung 2) erfolgte anhand einer groben Unterscheidung der kartierten Lockergesteinstypen nach ihrem Bildungsalter (Jungschutt vs. Altschutt). Der Großteil der Täler wurde dem Typ Altschuttwildbach (überwiegend Moräne, Blockgletscher, fossiler Hangschutt in der SCA) zugewiesen, 4 Einzugsgebiete wurden als Jungschuttwildbäche (überwiegend rezenter Hangschutt, fluviatile/fluvioglaziale Ablagerungen in der SCA) eingestuft.

Letztendlich haben die Untersuchungen gezeigt, dass sowohl die morphometrischen Eigenschaften als auch die geologischen Verhältnisse in einem Einzugsgebiet einen Einfluss auf die Murgangaktivität ausüben. Gleichzeitig wird anhand der auftretenden Kollinearitäten zwischen den untersuchten Parametern ersichtlich, dass eine voneinander unabhängige Betrachtung der Einflussfaktoren oft schwierig ist, zumal diese sich auch zusätzlich gegenseitig beeinflussen können. Für zukünftige Forschungsarbeiten würde sich deshalb anbieten, Wechselwirkungen zwischen Merkmalen gezielt auszublenken, indem beispielsweise für die Untersuchung des geologischen Einflusses Einzugsgebiete mit ähnlicher Topographie (z.B. auf Basis der Melton-Zahl) herangezogen werden. Generell wäre eine Einbeziehung weiterer wesentlicher Einflussfaktoren wie Klima, Tektonik, Landnutzung, Vegetation oder das Abschmelzen des Permafrosts sinnvoll, welche aufwandsbedingt in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt werden konnten.

Abschließend kann gesagt werden, dass sich die Erfassung geomorphologischer Flächeninformationen anhand einer GIS-basierten Fernerkundung als geeignete Alternative zur Kartierung vor Ort erweist, da mithilfe hochauflösender Geländemodelle und Orthofotos auch feinere Geländestrukturen gut erkannt werden können. Detailliertere Aufnahmen im Rahmen einer Feldbegehung, speziell von geologischen Informationen, können dadurch jedoch nicht ersetzt werden. Die im Rahmen dieser Arbeit erstellte digitale Karte der Fest- und Lockergesteine, geschieberelevanten Flächen und Ablagerungskegel (siehe Anhang) stellt eine gute Basis für weiterführende Untersuchungen in den gegenständlichen Einzugsgebieten dar.

## 7 Literaturverzeichnis

Bardou, E. (2002): Methodologie de diagnostic et prevision des laves torentielles sur un basin versant alpin. These no. 2479, Ecole Polytechnique Federale Lausanne.

Bonnet-Staub, I. (1999): Définition d'une typologie des dépôts de laves torrentielles et identification de critères granulométriques et géotechniques concernant les zones sources. In: *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 57 (4), S. 359–367. DOI: 10.1007/s100640050059.

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (2020a): eHYD. Bemessungsniederschlag 2020. Online verfügbar unter <https://ehyd.gv.at/>, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (2020b): eHYD. Mittlerer Jahresniederschlag. Online verfügbar unter <https://ehyd.gv.at/>, zuletzt geprüft am 22.01.2021.

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (2020c): Ereignisdokumentation 2019. IAN Report 209. Online verfügbar unter [https://www.bmlrt.gv.at/forst/wildbach-lawinenverbauung/aktuelles-dienststellen-fachabteilung/ereignisdoku\\_2019.html](https://www.bmlrt.gv.at/forst/wildbach-lawinenverbauung/aktuelles-dienststellen-fachabteilung/ereignisdoku_2019.html), zuletzt geprüft am 11.02.2021.

Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (2021): Ereignisdokumentation: Durchführung und Institutionen. Online verfügbar unter <https://www.naturgefahren.at/karten/chronik/ereignisdoku.html>, zuletzt geprüft am 12.05.2021.

Duller, C. (2018): Einführung in die nichtparametrische Statistik mit SAS, R und SPSS. Ein anwendungsorientiertes Lehr- und Arbeitsbuch. 2. Aufl. Berlin: Springer Gabler (Lehrbuch).

Ebermann, E. (2010): Grundlagen statistischer Auswertungsverfahren. Online verfügbar unter <https://www.univie.ac.at/ksa/elearning/cp/quantitative/quantitative-108.html>, zuletzt geprüft am 26.04.2021.

Engl, D. A.; Fellin, W.; Zangerl, C. (2008): Scherfestigkeiten von Scherzonengesteinen - Ein Beitrag zur geotechnischen Bewertung von tektonischen Störungszonen und Gleitzonen von Massenbewegungen. In: *Bulletin für Angewandte Geologie* 13 (2), S. 63–81.

Esri (2016): ArcMap. Schummerung (Funktion). Online verfügbar unter <https://desktop.arcgis.com/de/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/hillshade-function.htm>, zuletzt geprüft am 15.02.2021.

Geologische Bundesanstalt (o. J.): GEOFAST - Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt. Online verfügbar unter <https://www.geologie.ac.at/forschung-entwicklung/geofast-zusammenstellung-ausgewaehelter-archivunterlagen-der-geologischen-bundesanstalt>, zuletzt geprüft am 09.02.2021.

Geologische Bundesanstalt (2011a): GEOFAST - Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt 1:50.000. Blatt 145 Imst. Wien.

Geologische Bundesanstalt (2011b): GEOFAST - Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt 1:50.000. Blatt 146 Ötz. Wien.

Geologische Bundesanstalt (2012a): GEOFAST - Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt 1:50.000. Blatt 173 Sölden. Wien.

Geologische Bundesanstalt (2012b): GEOFAST - Zusammenstellung ausgewählter Archivunterlagen der Geologischen Bundesanstalt 1:50.000. Blatt Weißkugel 172. Wien.

Geologische Bundesanstalt (2015): Geologische Übersichtskarte der Republik Österreich 1:1.500.000. Wien.

Glade, T.; Dikau, R. (2001): Gravitative Massenbewegungen: Vom Naturereignis zur Naturkatastrophe. In: Petermanns Geographische Mitteilungen 145, S. 42-53.

Hammer, W. (1929): Erläuterungen zur Geologischen Spezialkarte der Republik Österreich, Blatt Ötztal (5146), 58 S., 1 Abb., Wien.

Hasslacher, P.; Lanegger, C. (1988): Österreichs Gletscherbachinventar. Fachbeiträge des Österr. Alpenvereins. Serie Alpine Raumordnung, Nr. 1, S. 1-33. Innsbruck.

Heinimann, H.; Hollenstein, K.; Kienholz, H.; Krummenacher, B.; Mani, P. (1998): Methoden zur Analyse und Bewertung von Naturgefahren. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft BUWAL, Umwelt-Materialien 85, Bern, 248 S.

Heiser, M.; Scheidl, C.; Eisl, J.; Spangl, B.; Hübl, J. (2015): Process type identification in torrential catchments in the eastern Alps. In: *Geomorphology* 232, S. 239–247. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.01.007.

Heitzmann, P. (1985): Kakirite, Kataklasite, Mylonite - Zur Nomenklatur der Metamorphite mit Verformungsgefügen. In: *Eclogae Geologicae Helveticae* 78 (2), S. 273–286.

Hoek, E.; Brown, E. T. (1997): Practical estimates of rock mass strength. In: *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 34 (8), S. 1165–1186. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)80069-X.

Hoernes, S.; Hoffer, E. (1973): Der Amphibolitzug des mittleren Ötztals (Tirol). Veröff. Tiroler Landesmuseum Ferdinandeum. Innsbruck. S. 159-180.

Hübl, J. (2012): Naturgefahren im alpinen Raum. Online verfügbar unter <https://www.oebg.org/veranstaltungen/archiv/rueckblick-und-ergebnisse-der-oebg-jahrestagung-2012/>, zuletzt geprüft am 09.06.2021.

Hürlimann, M.; Lantada, N.; González, M.; Pinyol, J. (2016): Susceptibility assessment of rainfall-triggered flows and slides in the central-eastern Pyrenees. In: S. Aversa, L. Cascini, L. Picarelli und C. Scavia (Hg.): *Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*: CRC Press, S. 1129–1136.

Jackson, L. E.; Kostaschuk, R. A.; MacDonald, G. M. (1984): Identification of debris flow hazard on alluvial fans in the Canadian Rocky Mountains. *Geological Society of America. Reviews in Engineering Geology* (1987), Volume VII. S. 115-124.

- Kessler, M. (2019): Morphometrische Untersuchung von Mur- und Schwemmkegeln in den österreichischen Alpen unter Berücksichtigung des Prozessregimes. Diplomarbeit/Masterarbeit - Institut für Alpine Naturgefahren (IAN), Universität für Bodenkultur Wien, 104 S.
- Kienholz, H. (1995): Gefahrenbeurteilung und -bewertung – auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. In: *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 146 (9), S. 701–725.
- Kilian, W.; Müller, F.; Starlinger, F. (1994): Die forstlichen Wuchsgebiete Österreichs. Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten. FBVA-Berichte 82/1994. Forstliche Bundesversuchsanstalt. Wien. 60 S.
- Kogelnig-Mayer, B.; Stoffel, M.; Schneuwly-Bollschweiler, M.; Hübl, J.; Rudolf-Miklau, F. (2011): Possibilities and Limitations of Dendrogeomorphic Time-Series Reconstructions on Sites Influenced by Debris Flows and Frequent Snow Avalanche Activity. In: *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 43 (4), S. 649–658. DOI: 10.1657/1938-4246-43.4.649.
- Krainer, K. (2010): Kapitel 2: Geologie und Geomorphologie von Obergurgl und Umgebung. In: Koch, E.-M. & Erschbamer, B. (Hg.): Glaziale und periglaziale Lebensräume im Raum Obergurgl. Innsbruck: university press, S. 31–52.
- Krainer, K. (2015): Kapitel 2: Blockgletscher in den Öztaler und Stubai Alpen: Eine Übersicht. In: N. Schallhart und B. Erschbamer (Hg.): Forschung am Blockgletscher. Methoden und Ergebnisse. Innsbruck: university press, S. 33–54.
- Krainer, K.; Ribis, M. (2011): Blockgletscherinventar Tirol. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, Nr. 87, S. 67-88. Wien.
- Land Tirol (o. J.): Planungsverband 12 - Pitztal. Online verfügbar unter <https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/statistik/regionsprofile/plv12/>, zuletzt geprüft am 19.01.2021.
- Land Tirol (2020a): Current and historical orthoimagery of Tyrol. Online verfügbar unter <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/35691b6c-9ed7-4517-b4b3-688b0569729a>, zuletzt geprüft am 09.02.2021.
- Land Tirol (2020b): Gewässernetz Tirol. Online verfügbar unter <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/cb2f663a-678e-4253-be61-f5125c14d143>, zuletzt geprüft am 17.02.2021.
- Land Tirol (2020c): Hydrographische Kenndaten. Online verfügbar unter <https://www.tirol.gv.at/umwelt/wasser/wasserkreislauf/kenndaten/>, zuletzt geprüft am 19.01.2021.
- Lin, C. W.; Wu, M. C.; Shieh, C. L. (2000): Influence of geology on debris-flows: examples from Hsin-Yi, Nantou County, Taiwan. In: Wieczorek, G. F. & Naeser, N. D. (Hg.): Debris flow hazard mitigation: mechanics, prediction and assessment. Proceedings of the second international conference on debris-flow. Rotterdam: Balkema, S. 169–176.
- Luzian, R. (Hg.); Kohl, B.; Bichler, I.; Kohl, J.; Bauer, W. (2002): Wildbäche und Muren. Eine Wildbachkunde mit einer Übersicht von Schutzmaßnahmen der Ära Aulitzky. Wien: Forstliche Bundesversuchsanst. Waldforschungszentrum.

Marchi, L.; Tecca, P. R. (1995): Alluvial fans of the Eastern Italian Alps: morphometry and depositional processes. In: *Geodinamica Acta* 8 (1), S. 20–27. DOI: 10.1080/09853111.1995.11105270.

Melton, M. A. (1965): The Geomorphic and Paleoclimatic Significance of Alluvial Deposits in Southern Arizona. In: *The Journal of Geology* 73(1), S. 1-38.

Mittelsten Scheid, T. (2011): Untersuchung der naturräumlichen Rahmenbedingungen der Entstehung von Talmuren - Grundlage einer Modellierung zur Gefahrenabschätzung. Dissertation - Fakultät für Geowissenschaften, LMU München, 118 S.

Moscariello, A.; Marchi, L.; Maraga, F.; Mortara, G. (2002): Alluvial fans in the Alps: sedimentary facies and processes. In: I. P. Martini und Baker, V. R. & Garzón, G. (Hg.): Flood and megaflood processes and deposits: Recent and ancient examples. Oxford: Blackwell Science (Special publication / International Association of Sedimentologists, 32), S. 141–166.

Nettleton, I. M.; Martin, S.; Hencher, S.; Moore, R. (2005): "Debris flow types and Mechanisms". In: M. G. Winter und Macgregor, F. & Shackman, L. (Hg.): Scottish road network landslides study. Edinburgh: Scottish Executive, S. 45–119.

Neuwirth, C. (2011): Modellierung von Murgangprozessen in Wildbacheinzugsgebieten des Oberen Saalachtals. In: Strobl, J., Blaschke, T., Griesebener, G. (Hg.): Angewandte Geoinformatik 2011. Heidelberg: Wichmann Verlag. S. 116-125.

Okrusch, M.; Matthes, S. (2014): Mineralogie. Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde. 9. Aufl. Berlin: Springer Spektrum (Lehrbuch).

Ortner, H. (2015): Fernerkundung mit Hilfe von Orthofotos und Geländemodellen in der Geologie – Beispiele aus den nördlichen Kalkalpen. In: *Geo.Alp*, 11 (2014), S. 5–28.

Purtscheller, F. (1978): Ötztaler und Stubai Alpen. Sammlung geologischer Führer Nr. 53. 2. Aufl. Berlin/Stuttgart: Gebrüder Bornträger Verlag.

Rode, S. (2008): Metamorphose im Ötztalkristallin. Online verfügbar unter <https://www.geozentrum-tirol.at/downloads.html>, zuletzt geprüft am 25.01.2021.

RWTH Aachen (2011): Überblick über die Ötztaler Alpen. Online verfügbar unter [http://www.ged.rwth-aachen.de/index.php?cat=Education&subcat=Alps\\_Excursion\\_2011&page=%C3%9Cberblick\\_%C3%BCber\\_die\\_%C3%96tztaler\\_Alpen](http://www.ged.rwth-aachen.de/index.php?cat=Education&subcat=Alps_Excursion_2011&page=%C3%9Cberblick_%C3%BCber_die_%C3%96tztaler_Alpen), zuletzt geprüft am 25.01.2021.

Stiny, J. (1931): Die Geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern. Wien: Springer.

Stöhr, D. (2020): Stumme Zeugen. Online verfügbar unter <https://www.bergundsteigen.blog/stumme-zeugen/>, zuletzt geprüft am 11.01.2021.

Strahler, A. N. (1958): Dimensional analysis applied to fluviially eroded landforms. In: *Geol Soc America Bull* 69 (3), S. 279–300. DOI: 10.1130/0016-7606(1958)69[279:DAATFE]2.0.CO;2.

- Tiranti, D. (2016): La previsione delle colate detritiche in ambiente alpino. Online verfügbar unter <https://www.arpa.piemonte.it/arpa-comunica/slide/svitodicadore60616-2.pdf>, zuletzt geprüft am 01.06.2021.
- Tiranti, D.; Crema, S.; Cavalli, M.; Deangeli, C. (2018): An Integrated Study to Evaluate Debris Flow Hazard in Alpine Environment. In: *Front. Earth Sci.* 6:60. DOI: 10.3389/feart.2018.00060.
- Tiranti, D.; Cremonini, R.; Marco, F.; Gaeta, A. R.; Barbero, S. (2014): The DEFENSE (debris Flows triggered by storms – nowcasting system): An early warning system for torrential processes by radar storm tracking using a Geographic Information System (GIS). In: *Computers & Geosciences* 70, S. 96–109. DOI: 10.1016/j.cageo.2014.05.004.
- Tiranti, D.; Deangeli, C. (2015): Modeling of debris flow depositional patterns according to the catchment and sediment source area characteristics. In: *Front. Earth Sci.* 3. DOI: 10.3389/feart.2015.00008.
- Tirol Atlas (o. J.): Bildersammlung "Pitztal". Online verfügbar unter <https://tirolatlas.uibk.ac.at/places/images.py/show?lang=de;id=1610031>, zuletzt geprüft am 19.01.2021.
- Tourismusverband Pitztal (2018): Region Pitztal. Online verfügbar unter <https://www.pitztal.com/de/region#:~:text=Das%20Pitztal%20ist%20ein%20s%C3%BCdliches,Gebirgsstock%20der%20C3%96tztaler%20Alpen%20vor.>, zuletzt geprüft am 19.01.2021.
- Traper, S. (2016): Influential factors on the occurrence and characteristics of debris flow events in alpine regions: case studies from two geologically different regions in Styria. Diplomarbeit. Universität Wien.
- Viles (2020): Konzepte und Definitionen im Modul XI-2. Das einfache lineare Korrelationsmodell. Online verfügbar unter [http://vilespc01.wiwi.uni-oldenburg.de/navtest/viles1/kapitel11\\_Regression~\und~\Korrelation/modul02\\_Das~\leinfache~\lineare~\Korrelationsmodell/ebene01\\_Konzepte~\und~\Definitionen/11\\_\\_02\\_\\_01\\_\\_01.php3](http://vilespc01.wiwi.uni-oldenburg.de/navtest/viles1/kapitel11_Regression~\und~\Korrelation/modul02_Das~\leinfache~\lineare~\Korrelationsmodell/ebene01_Konzepte~\und~\Definitionen/11__02__01__01.php3), zuletzt geprüft am 19.03.2021.
- Wilford, D. J.; Sakals, M. E.; Innes, J. L.; Sidle, R. C.; Bergerud, W. A. (2004): Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. In: *Landslides* 1 (1), S. 61–66. DOI: 10.1007/s10346-003-0002-0.
- Wollschläger, D. (2017): Grundlagen der Datenanalyse mit R. Eine anwendungsorientierte Einführung. 4. Auflage. Berlin: Springer Spektrum (Statistik und ihre Anwendungen).
- Zimmermann, M.; Mani, P.; Gamma, P.; Gsteiger, P.; Heiniger, O.; Hunziker, G. (1997): Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz. NFP 31 Schlussbericht. vdf Hochsch.-Verl. an der ETH Zürich.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhang zwischen Grunddisposition, variabler Disposition und auslösenden Faktoren (Quelle: Hübl 2012, S.18, modifiziert von Stöhr 2020).....	2
Abbildung 2: Schematische Darstellung der stratigraphischen Profile von Murablagerungen in den drei CWI-Klassen (Quelle: Moscariello et. al 2002, S.145, modifiziert von Tiranti et al. 2014) .....	5
Abbildung 3: Lage des Pitztals im Bundesland Tirol.....	8
Abbildung 4: Lage der untersuchten Einzugsgebiete im vorderen, nördlichen Pitztal .....	10
Abbildung 5: Lage der untersuchten Einzugsgebiete im hinteren, südlichen Pitztal .....	11
Abbildung 6: Geologische Übersicht des Ötztal-Stubai-Komplexes. Das Pitztal befindet sich am nordwestlichen Rand (Quelle: Geologische Bundesanstalt 2015, verändert) .....	13
Abbildung 7: Handstück eines Zweiglimmerigen Schiefergneises (Biotit-Muskovit-Plagioklasgneis) im Einzugsgebiet Kitzelesbach (Blick auf die Schieferungsebene). Auffallend ist die rot-braune Verwitterungsfarbe. ....	14
Abbildung 8: Feinkörniger Biotitschiefer mit dünnplattiger Schichtung (Lagen im mm- bis cm-Bereich) im Einzugsgebiet Kitzelesbach. Der Aufschluss im rechten Bild zeigt eine besonders feine Ausprägung der Schieferungsflächen. ....	15
Abbildung 9: Beispiele verschiedener Orthogneise im Einzugsgebiet Kitzelesbach .....	16
Abbildung 10: Aktiver Blockgletscher im Einzugsgebiet Kitzelesbach .....	19
Abbildung 11: Abgrenzung der Lockergesteinstypen Moräne und Hangschutt im Gelände (Einzugsgebiet Kitzelesbach).....	26
Abbildung 12: Kartierung der Fest- und Lockergesteine am Beispiel des Einzugsgebietes Leibach .....	28
Abbildung 13: Einteilung der Festgesteinsarten nach dem Clay-Weathering-Index (CWI) in die zwei Klassen Good Clay-Maker (GCM) und Bad Clay-Maker (BCM) .....	31
Abbildung 14: Berechnete Sediment Contributing Area (SCA) am Beispiel der Einzugsgebiete Kitzelesbach, Perlekarbach und Reiselebach (von Norden nach Süden) .....	35
Abbildung 15: Darstellung des murfähigen Gerinnes am Beispiel des Einzugsgebietes Sagebach. Aufgrund des ausgedehnten Flachstückes wurde an dieser Stelle der oberhalb anschließende Gerinneabschnitt als nicht murfähig eingestuft und für die Berechnung der murfähigen Gerinnelänge entfernt. ....	37
Abbildung 16: Kartierte Ablagerungskegel am Beispiel der Einzugsgebiete Lussbach, Kitzelesbach, Perlekarbach und Reiselebach .....	41

---

Abbildung 17: Anteile der murfähigen Gerinnelängen am Gesamtgerinne je Einzugsgebiet...	47
Abbildung 18: Streudiagramm-Matrix der unabhängigen Variablen (geomorphometrische und geologische Parameter).....	51
Abbildung 19: Melton-Zahl gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie .....	53
Abbildung 20: Melton-Zahl gegen Melton-Zahl des Kegels mit linearer Trendlinie .....	53
Abbildung 21: Reliefverhältnis gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie .....	54
Abbildung 22: Länge des murfähigen Gerinnes gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie.....	55
Abbildung 23: Länge des murfähigen Gerinnes gegen Melton-Zahl des Kegels mit linearer Trendlinie.....	55
Abbildung 24: Anteil der Good Clay-Maker-Festgesteine an der Festgesteinsfläche gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie .....	57
Abbildung 25: Anteil der Good Clay-Maker-Festgesteine an der Festgesteinsfläche gegen Melton-Zahl (Kegel) mit linearer Trendlinie.....	57
Abbildung 26: Anteil der Sediment Contributing Area an der Einzugsgebietsfläche gegen mittlere Kegelneigung mit linearer Trendlinie.....	58
Abbildung 27: Anteil des Hangschutts an der Sediment Contributing Area gegen Kegelfläche mit linearer Trendlinie .....	59
Abbildung 28: Anteil der Moränenablagerungen an der Sediment Contributing Area gegen Kegelfläche mit linearer Trendlinie.....	59
Abbildung 29: Anteil des murfähigen Gerinnes gegen Melton-Zahl des Einzugsgebietes mit linearer Trendlinie .....	63
Abbildung 30: Darstellung der zeitlichen Abfolge der Murgangereignisse laut Ereignisdokumentation der WLV. Im Falle des Reiselbachs wurden zusätzlich drei Ereignisse (2002, 2005, 2009) aus der Publikation von Kogelnig-Mayer et al. (2011) hinzugefügt. Der als Jungschuttwildbach eingestufte Reiselebach weist eine regelmäßigerere Ereignisabfolge auf als die Einzugsgebiete Mitterbach, Enzenstallermurbach und Grünbach II, welche den Altschuttwildbächen zugeordnet wurden. ....	68

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen von Tiranti et al. (2014) (Quelle: nach Tiranti et al. 2014, S.101) .....	5
Tabelle 2: Ausgewählte Einzugsgebiete mit Kürzel und Flächenangabe. Grün hinterlegt: Einzugsgebiete im vorderen Tal; blau hinterlegt: Einzugsgebiete im hinteren Tal .....	10
Tabelle 3: Im Rahmen der Kartierung erfasste Festgesteinsarten .....	24
Tabelle 4: Vorgaben für die Abschätzung der einaxialen Druckfestigkeit im Gelände (Quelle: Hoek und Brown 1997, S.3).....	30
Tabelle 5: Auflistung der Einzugsgebiete, deren Kegel neu kartiert wurden und jener, bei denen die Kegelpolygone von Kessler (2019) übernommen wurden.....	40
Tabelle 6: Bezeichnungen für die Stärke der Korrelation (Quelle: nach Viles 2020) .....	44
Tabelle 7: Ergebnisse der untersuchungsrelevanten morphometrischen und geologischen Parameter .....	48
Tabelle 8: Ergebnisse der erhobenen Ereignis- und Kegeldaten je Einzugsgebiet.....	50
Tabelle 9: Ergebnisse der statistischen Korrelationsanalysen für die morphometrischen Parameter. Für jeden untersuchten Zusammenhang ist das verwendete Testverfahren, der entsprechende Korrelationskoeffizient $\rho$ und die Signifikanz (p-Wert) angegeben. Signifikante Zusammenhänge ( $p < 0,05$ ) sind gelb hinterlegt. ....	52
Tabelle 10: Ergebnisse der statistischen Korrelationsanalysen für die geologischen Parameter. Für jeden untersuchten Zusammenhang ist das verwendete Testverfahren, der entsprechende Korrelationskoeffizient $\rho$ und die Signifikanz (p-Wert) angegeben. Signifikante Zusammenhänge ( $p < 0,05$ ) sind gelb hinterlegt.....	56

## 10 Anhang

Im Folgenden sind die kartierten Festgesteinsflächen (unterteilt in GCM und BCM), Lockergesteinsflächen, Ablagerungskegel sowie die ermittelte geschieberelevante Fläche und das murfähige Gerinne je Einzugsgebiet dargestellt.

Söllbergbach, Äußerer Burgbach, Innerer Burgbach, Karbach.....	S. 82
Dunkelrinnerbach, Saxuiererbach, Sagebach.....	S. 83
Grünbach I, Grünbach II, Zaunhoferbach, Mitterbach, Enzenstallermurbach, Neschelbach...	S. 84
Hairlachbach, Bichlbach.....	S. 85
Leibach, Lussbach.....	S. 86
Hundsbach, Morlebach.....	S. 87
Kitzelesbach, Perlekarbach.....	S. 88
Reiselebach, Wassertalbach.....	S. 89

### Legende:

		Lockergesteine	Sonstiges
	Good Clay-Maker (GCM)	 Blockgletscher	 See
	Bad Clay-Maker (BCM)	 Moräne, undifferenziert	 Gletscher
	Sediment Contributing Area (SCA)	 Hangschutt, Blockschutt, Verwitterungsschutt	 Ablagerungskegel
		 fluviale/fluvioglaziale Sedimente	 murfähiges Gerinne
			 nicht murfähiges Gerinne

