



Bachelorarbeit am Geographischen  
Institut der Philosophisch-  
naturwissenschaftlichen Fakultät

# Sukzession einer Murgangablagerung im Schweizerischen Nationalpark

**Eliane Kolb**

*eliane.kolb@students.unibe.ch*

**Universität Bern**

Abgabe: 29.01.2025

Betreuung: Virginia Ruiz-Villanueva

## Abstract

Natürliche Störungen sind essenzielle Faktoren für die ökologische Dynamik in Hochgebirgslandschaften. Murgänge, die durch Starkniederschläge, schmelzenden Permafrost oder geologische Instabilität ausgelöst werden, hinterlassen Ablagerungen, deren langfristige Entwicklung bislang wenig erforscht ist. Die vorliegende Arbeit untersucht die Entwicklung einer Murgangablagerung im schweizerischen Nationalpark – einem Gebiet ohne menschliche Einflüsse – und analysiert sie anhand mehrerer Variablen. Die strukturellen Eigenschaften, topografischen Faktoren sowie mikroklimatischen Bedingungen charakterisieren den veränderten Lebensraum und liefern Informationen über dessen Entwicklung.

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wurde die Kombination von photogrammetrischer Korngrößenanalyse mit BASEGRAIN, topografischer Analyse mit QGIS und statistischer Datenauswertung mit Excel angewendet. Die Ergebnisse zeigen, dass grössere Körner in mächtigeren Ablagerungsschichten vorkommen, welche durch eine geschlossene Gesteinsdecke geprägt ist. Niedrige Ablagerungsschichten sind stärker von der Vegetation beeinflusst und weisen insgesamt feinere Korngrößen auf. Die Ablagerungsoberfläche weist insgesamt eine gute Sortierung der Körnung auf, was vermutlich durch erosive Prozesse bedingt ist. Größere Partikel wurden eher in flachen Gebieten abgelagert, während kleinere Körner in steilen Hängen, auf höher gelegenen Lagen vorzufinden sind. Zwischen der Korngrösse und den mikroklimatischen Faktoren konnte keine signifikante Korrelation festgestellt werden. Jedoch deuten erste Trends darauf hin, dass gröberes Substrat mit tieferen Temperaturen und höheren Feuchtigkeitswerten einhergehen.

Die Untersuchung verdeutlicht, dass geomorphologische und topografische Faktoren für die Sukzession einer Störung dieser Art eine wesentliche Rolle spielen. Die Heterogenität der Ablagerung beeinflusst die Variabilität des Lebensraums und damit die Bedingungen für die ökologische Regeneration. Um allgemeingültige Aussagen über die langfristige Entwicklung des Untersuchungsgebiets entwickeln zu können, ist die weiterführende Dokumentation vergleichbarer Datensätze erforderlich. Künftige Analysen könnten die Vegetationsentwicklung sowie die genauere Untersuchung von klimatischen Bedingungen beinhalten.

## **Danksagung**

Gerne möchte ich mich für die Unterstützung all jener, die mich während der Erstellung dieser Arbeit begleitet haben, bedanken. Ein herzlicher Dank richtet sich an die Betreuungsperson Virginia Ruiz-Villanueva für ihre wertvollen Ratschläge, Ideen und Anregungen, sowie ihre ständige Bereitschaft aufkommende Fragen zu beantworten. Ein grosses Dankeschön richte ich auch an Patrice Kolb für seine Unterstützung, insbesondere bei statistischen und programmtechnischen Fragen, sowie für die Korrektur. Mirjam Gasche danke ich herzlich für ihre Bereitschaft, jegliche Fragen zu beantworten sowie Manuel Brügger und Simone Kolb für das Gegenlesen der Arbeit. Ich danke ausserdem meiner Familie und Freunden für den erfahrenen Beistand.

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung .....	1
1.1 Allgemeiner Kontext.....	1
1.2 Theoretische Grundlagen .....	2
1.2.1 Murgang .....	2
1.2.2 Korngrösse und Lebensraumdynamik .....	3
1.3 Stand der Forschung .....	5
1.4 Ziel der Arbeit .....	6
2 Untersuchungsgebiet.....	7
2.1 Nationalpark & Forschungsobjekt .....	7
2.2 Murgangereignis.....	8
2.3 Daten.....	9
2.3.1 Drohnenaufnahmen .....	9
2.3.2 Feldarbeit .....	9
2.3.3 Fotos von Plots.....	10
2.3.4 Temperatur & Feuchtigkeit Logger .....	11
2.3.5 Vegetation .....	11
2.3.6 Weitere Datensätze .....	11
3 Methoden .....	11
3.1 Literaturrecherche .....	11
3.2 BASEGRAIN.....	12
3.3 QGIS .....	14
3.4 Excel .....	14
4 Ergebnisse .....	15
4.1 Datenanalyse.....	15
4.1.1 Gewichtung einzelner Datenpunkte .....	15
4.1.2 Statistische Untersuchung .....	16
4.1.3 Topografie.....	19
4.1.4 Loggerdaten Klima .....	22
4.1.5 Weitere durchgeführte Tests ohne Aussagekraft.....	23

4.2 Übersicht der Ergebnisse.....	24
5 Diskussion.....	24
5.1 Interpretation der Ergebnisse.....	25
5.1.1 Anteil Steine .....	25
5.1.2 Statistische Kennwerte .....	26
5.1.3 Topografische Variablen.....	28
5.1.4 Klimatische Bedingungen .....	30
5.2 Kritische Beurteilung der Methoden.....	30
5.2.1 Vorschläge zur verbesserten Verarbeitung .....	31
5.3 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext .....	32
5.4 Beantwortung der Forschungsfragen.....	32
6 Schlussfolgerung & Ausblick.....	34
Datenverfügbarkeit .....	VIII
Literaturverzeichnis .....	IX
Anhang.....	XII

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Murgangfächer.....	2
Abbildung 2: Ablagerungsformen in der Murgangrinne. ....	2
Abbildung 3: Übersichtskarte Untersuchungsgebiet .....	7
Abbildung 4: Übersicht Murgangablagerung mit Darstellung der beprobten Standorte. ....	10
Abbildung 5: Detaillierte Ansicht der Standorte einer Höhenstufe.....	10
Abbildung 6: Bildserie von drei Arbeitsschritten in BASEGRAIN.....	13
Abbildung 7: Anteile der Flächen an Steinen im analysierten Bild.....	15
Abbildung 8: Kennzahlenvergleich der Korngrößenverteilungen .....	16
Abbildung 9: Median der Korngrösse nach Höhenstufe .....	19
Abbildung 10: Quantil 84 der Korngrösse nach Höhenstufe .....	19
Abbildung 11: Neigungswinkel der Murgangoberfläche nach Höhenstufe.....	20
Abbildung 12: Quantil 84 der Korngrösse nach Neigungswinkel.....	21
Abbildung 13: Quantil 84 der Korngrösse nach der Distanz zum Ablagerungsrand .....	21
Abbildung 14: Mittelwerte der Temperaturmessung nach Median der Korngrösse.....	22
Abbildung 15: Mittelwerte der Feuchtigkeitsmessung nach Median der Korngrösse.....	23
Abbildung 16: Beispiel für Kontrollstandort, Standort C100 .....	25
Abbildung 17: Fotoplot Standort H60.....	29
Abbildung 18: Fotoplot Standort H40.....	29

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wölbung der Korngrößenverteilung mit Klassifikation .....	17
Tabelle 2: Schiefe der Korngrößenverteilung mit Klassifikation .....	17
Tabelle 3: Variablen ohne Aussagekraft oder nachweisbare Korrelation. ....	24

## Definitionen & Abkürzungen

Begriff/Abkürzung	Definition
b-Achse	Die Breite eines Korns, wenn die a-Achse der Länge und die c-Achse der Tiefe entspricht
DSM	Digitales Höhenmodell (engl. digital surface model)
DTM	Digitales Geländemodell (engl. digital terrain model)
Fotoplots C	Kontrollfläche (engl. control)
Fotoplots L	Ablagerungsmächtigkeit < 0.5 m (engl. low)
Fotoplots H	Ablagerungsmächtigkeit > 1 m (engl. high)
Gradientfilter-technik	Helligkeit zwischen benachbarten Pixeln wird auf Grenze untersucht damit Zwischenräume sichtbar werden
Graustufen-schwellenansatz	Pixel mit Grauwert über/unter Schwellenwert wird als hell/dunkel eingestuft
Hauptdolomit	In Alpen weit verbreitetes, karbonatisches Sedimentgestein, das durch die Umwandlung von Kalkstein unter magnesiumreichen Bedingungen entstanden ist
Kolk	Wassergefüllte Vertiefungen wie Strudellöcher oder Moorseen
Morphologische Bottom-Hat-Filtrierung	Dunkle Objekte werden auf hellerem Hintergrund hervorgehoben (Zwischenräume werden hervorgehoben)
Pfropfenbildung	Blockierung einer Rinne (hier: Murgang) durch festeres Material
Rasterlayer	Regelmässig angeordnetes Gitter von Zellen, die je einen numerischen Wert darstellen
SNP	Schweizerischer Nationalpark
Sukzession	Schrittweiser Wiederaufbau von Lebensgemeinschaften eines gestörten Ökosystems
Trias	Geologisches Zeitalter, das vor ca. 250-200 Mio. Jahren stattfand. „Phase der Erholung“ nach grösstem Massenaussterben der Erdgeschichte (Ende Perm)
Vektorlayer	Geografische Objekte, die durch geometrische Formen dargestellt werden
Wasserscheidealgorithmus	Zu analysierendes Bild wird als Höhenmodell gelesen, wobei dunklere Bereiche einem tiefergelegenen Gebiet entsprechen. Wasser würde „Täler“ auffüllen und wird deshalb als Grenze identifiziert
Wasserscheidebrücken	Benachbarte oder überlappende Segmente werden voneinander getrennt

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeiner Kontext

Natürliche Störungen der Umwelt werden klassischerweise als grosse, katastrophale Ereignisse angesehen (White, 1979). Seitdem der Mensch die Alpen besiedelt, werden Naturereignisse als Bedrohung beachtet, da sie für die Infrastruktur und das Menschenleben grosse Gefahr darstellen können (Rixen & Brugger, 2004). Dabei gibt es für jede Störungsart einen Gradienten, welcher von kleinen Ereignissen wie Steinschlägen oder Sackungen, bis zu grösseren wie Hangrutschen, Lawinen, Murgängen oder gar Bergstürzen reicht. Trotz solcher Ereignisse, können Landschaften und Ökosysteme in einem dynamischen Gleichgewicht sein, wenn sich die lokalen Veränderungen im Ganzen ausgleichen. Die Reaktionen von Flora und Fauna auf Störungen sind feste Bestandteile des Musters, wie sich Landschaften entwickeln (White, 1979). Sie spielen für die Ökologie eine wichtige Rolle, da beispielsweise durch abgestorbene Bäume infolge Lawinenzügen neuer Platz geschaffen wird, der konkurrenzschwächeren Arten das Überleben ermöglicht (Rixen & Brugger, 2004). Nach Wohlgemuth et al. (2019) tragen Störungen zur Heterogenität von Ökosystemen in Raum und Zeit bei, wobei die langfristige Aufrechterhaltung der Ökosysteme und Biodiversität im Zentrum steht (Wohlgemuth et al., 2019). Die natürliche Regeneration ist aber nicht immer gewährleistet, da es auch zur Ausdehnung der schadensbetroffenen Flächen kommen kann (Topp, 1998).

Die Erwärmung des Klimas kann für einige Wassereinzugsgebiete durch höhere Niederschlagsintensitäten eine Zunahme der Murgangaktivität bedeuten. Gletscherrückgang und schwindender Permafrost destabilisieren Hochgebirgslandschaften, was für die Auslösemechanismen von Murgängen günstigere Bedingungen mit sich bringt. (Stoffel et al., 2024). Die steigenden Temperaturen führen dazu, dass sich Vegetationsgrenzen nach oben verschieben, was die Artenvielfalt in den betroffenen Gebieten beeinträchtigen kann. Auch durch diese Änderung und ein sich wandelndes Niederschlagsregime, werden Berghänge instabiler. Naturereignisse, die von der Stabilität des Untergrundes abhängig sind – somit auch Murgänge – werden somit in Zukunft häufiger auftreten (Eichel et al., 2023). Viele Theorien zur Störungsökologie wurden noch vor dem rasch voranschreitenden globalen, klimatischen Wandel entwickelt, werden aber weiterhin verwendet. Sie entstanden noch bevor Instrumente und Messgrössen zur Überprüfung zur Verfügung standen, weshalb es die Theorien unter der Verwendung neuer Erkenntnisse und konzeptioneller Fortschritte zu aktualisieren gilt. Es ist von entscheidender Bedeutung, zu verstehen, wie die Reaktionen der Ökosysteme auf Störungen in der heutigen, sich rasant entwickelnden Umwelt, gesteuert werden (Gough et al., 2024).

In der vorliegenden Arbeit geht es um die Untersuchung der Sukzession einer Murgangablagung. Anhand verschiedener Variablen wird das natürliche Entwicklungsverhalten des zerstörten und neu entstandenen Lebensraums untersucht und charakterisiert. Das Murgangereignis ist auf natürlichem Weg entstanden und befindet sich im Schweizerischen Nationalpark. Der Schutzstatus des Parks gewährleistet die natürliche Entwicklung der Landschaft, weshalb in dieser Arbeit auch vom Murgang als Naturereignis – und nicht als Naturgefahr – die Rede ist.

## 1.2 Theoretische Grundlagen

### 1.2.1 Murgang

Ein Murgang ist im Grunde genommen ein geomorphologischer Stofftransport, der aus einer Mischung von Sediment und Wasser besteht (Kaitna et al., 2024). Der Transport geschieht meist mit hoher Geschwindigkeit, wobei sich die Feststoffe unterhalb des Gefälleknicks ablagern. Es handelt sich beim Feststoffanteil um Bodenmaterial von unterschiedlichster Grösse, das von feinsten Tonpartikeln bis zu grobblockigem Hängeschutt reicht. Oft sind auch Totholz und Geschiebematerial darin enthalten. Die Zusammensetzung hängt mit der Dimension und den Eigenschaften des Einzugsgebiets zusammen (Weber, 2004). Murgänge entstehen in der Regel in gebirgigen Wasserscheiden, welche im Gegensatz zu solchen, die von Überschwemmungen dominiert werden, von steiler Topografie und schlecht ausgebildeten Abflusssystemen geprägt sind. Wenn es um die Auslösung eines Murgangs geht, kann das Einzugsgebiet als transportlimitiert oder materiallimitiert eingestuft werden, was entweder mit der Menge an zur

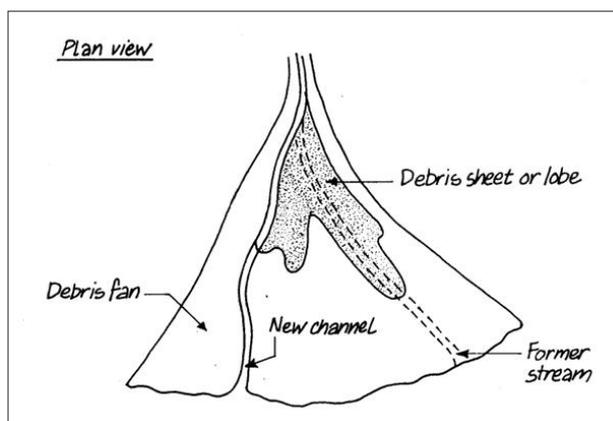


Abbildung 1: Murgangfächer (VanDine, 1996).

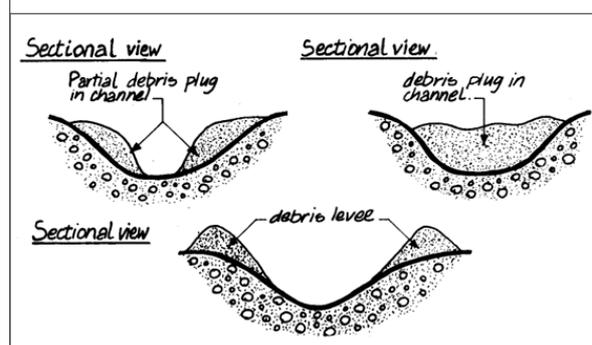


Abbildung 2: Ablagerungsformen in der Murgangrinne (VanDine, 1996).

Verfügung stehendem Wasser oder der Verfügbarkeit von Sedimenten zusammenhängt (Haas et al., 2024). Meist geschieht die Auslösung durch intensive Niederschlagsereignisse, wobei natürliche, nicht regenbedingte Auslöser, unter anderem Erdbeben, Seeausbrüche oder Überschwemmungen sind. Die Vorhersage von Murgangereignissen ist sehr schwierig, da die

Anfälligkeit eines Einzugsgebiets von komplexen geomorphologischen und hydrologischen Zusammenhängen charakterisiert ist (Kaitna et al., 2024).

Die Ablagerungsfächer von Murgängen weisen typischerweise Formen von Halbkegeln, Längen von 0.5 - 5 km und Hangneigungen von 5° - 15° auf. Sie sind eng mit der geomorphologischen Geschichte und Dynamik des ursprünglichen Wassereinzugsgebiets verbunden, da die Ablagerungen aus demselben Material bestehen (Haas et al., 2024). Je nach Beschaffenheit des Gerölls und dem Vorhandensein natürlicher oder künstlicher Hindernisse, nimmt der Ablagerungsfächer entsprechende Formen an. Wie in den Abbildungen 1 und 2 eingezeichnet, entstehen auf dem Schuttfächer (*debris fan*) Formen wie Schuttblätter-/loben (*debris sheet or lobe*), die Abdeckung eines veralteten Gerinnes (*former stream*) oder eine neue Gerinnebildung (*new channel*). In einer Murgangrinne kann es zu einer Pfropfenbildung (*debris plug in channel*), Schuttdammbildung (*debris levee*) oder einer Mischform (*partial debris plug in channel*) beider Ablagerungsformen kommen. Unabhängig von der Form ist der Ablagerungsschutt in der Regel grobkörnig, schlecht geschichtet und meist sehr schlecht sortiert (VanDine, 1996). Die einzelnen Körner sind meist durch halbrunde bis eckige Kanten charakterisiert. Eine Murgangablagerung entsteht an der Basis eines steilen Einzugsgebiets oder Hangs, wenn die Fließgeschwindigkeit und Fließtiefe durch den Verlust von topografischem Gefälle und Gerinnetiefe abnimmt. Die Ablagerung kann temporär eine Lagerung von Sediment und organischem Material darstellen, wobei sie durch geomorphologische Prozesse wie Erosion, Abfluss, äolische Deflation oder Bodenbildung geprägt wird. Falls der Murgangfächer von einem Bach mit höherer Ordnungszahl abgeschnitten wird oder in ein Stillgewässer mündet, kann die Form des Kegels entsprechend deformiert werden (Haas et al., 2024).

### 1.2.2 Korngrösse und Lebensraumdynamik

Wenn es darum geht, eine Murgangablagerung zu untersuchen und deren Entwicklung zu beobachten, sind Informationen über die Zusammensetzung der Deposition von entscheidender Bedeutung. Die Kenntnis über die Korngrößenverteilung ist unter anderem für die Berechnung des Sedimenttransportes, die Modellierung hydrologischer Prozesse oder die Klassifizierung von Lebensräumen interessant (Detert & Weitbrecht, 2013). Die Korngrößenanalyse ist eine Möglichkeit, die Grösse und den Anteil der jeweiligen Teilchen – also die Korngrößenverteilung – zu ermitteln. Dazu werden die im Kollektiv vorliegenden Teilchen auf eine bestimmte Art und Weise voneinander getrennt und in Gruppen gleicher Grösse eingeteilt. Das klassische Verfahren dazu ist die Laborsiebung. Dabei wird an einem geeigneten Standort eine Probe der Gesteinskörner genommen und in Siebböden gegeben. Durch die Bewegung der Gitter fallen die kleineren Steine auf die nächstkleineren Gitter, bis am Schluss alle Steine auf einem Siebboden mit einem gewissen Korngrößenbereich liegen. Die Trennkorngrösse

hängt nicht nur von der tatsächlichen Grösse, sondern auch von der Form des Korns, ab (Batel, 1971). Die b-Achse entspricht der Breite des Korns welche der kleineren Achse entspricht. Es ist die Grösse, welche für das Siebverfahren entscheidend ist. Auch die von Wolman (1954) beschriebene Methode des Kieselsteinezahlens ist eine Methode zur Untersuchung der Korngrößenverteilung. Dabei wird ein repräsentativer Ausschnitt eines Flussbetts ausgewählt und definiert. Es folgt die Probenahme von mindestens 100-300 Steinen, welche möglichst nach dem Zufallsprinzip ausgewählt werden. Der/die Untersuchende bewegt sich dazu durch das Untersuchungsgebiet und greift an zufälligen Orten nach unten, ohne die Partikel visuell auszuwählen. Die gesammelte Probe wird in unterschiedliche Korngrößen klassifiziert und anschliessend statistisch analysiert. Für Feldstudien ist diese Methode gut geeignet, aber es besteht das Risiko einer Verzerrung, wenn die Partikel dennoch unter subjektivem Einfluss der probenehmenden Person ausgewählt werden. Ausserdem ist diese Methode in der Anwendung für Körner mit kleinem Durchmesser nicht geeignet (Wolman, 1954).

Die klassische Laborsiebung ist auch für die repräsentative Detektion sehr kleiner Korngrößen anwendbar. Sie erfordert aber einen hohen technischen und personellen Aufwand, wobei der gesamte Prozess des Ausgrabens, Transportierens und Siebens zeit- und kostenintensiv ist. Zur Einsparung von Ressourcen wurden alternative Methoden entwickelt, welche mit anderen Mitteln und Berechnungen die Erstellung von Klassifizierungskurven ermöglichen (Detert & Weitbrecht, 2013). Dazu zählt die Grössenanalyse mittels Laserdiffraktometrie. Diese Methode beruht auf dem Prinzip, dass Partikel mit einer bestimmten Grösse das Licht unter einem bestimmten Winkel beugen, wobei dieser Winkel mit abnehmender Partikelgrösse zunimmt. Ein Strahl dieses Lichts wird durch eine Probenzelle geleitet, welche eine Suspension enthält und das gebeugte Licht auf mehrere (ca. 130) Detektoren fokussiert. Mit der gemessenen Lichtintensität werden unterschiedliche Beugungstheorien zur Berechnung der Korngrößen angewendet. Die Methode wird im Vergleich zur klassischen Laborsiebung als schneller beurteilt und weist eine gute Reproduzierbarkeit auf. Es ist wenig Probematerial notwendig und die Daten liegen direkt in digitalem Format vor (Beuselinck et al., 1997). Eine weitere Methode die weniger aufwändig als die Siebmethode ist, ist die von Fehr (1987) vorgestellte Linienzahlanalyse. In dem zu beprobenden Bereich werden Linien ausgelegt, unter welchen die Körner zur Vermessung ausgewählt werden. Für die Korngrössenanalyse werden die b-Achsen gemessen, gezählt und anschliessend mittels unterschiedlicher Formeln für die Unterschicht hochgerechnet (Fehr, 1987).

Detert & Weitbrecht (2013), entwickelten, basierend auf der von Fehr beschriebenen Linienzahlanalyse, eine Methodik zur Objekterkennung und ein entsprechendes Programm zur anschliessenden Korngrössenanalyse. Es wurden automatische Verfahren entwickelt, um Flächeninformationen aus digitalen Aufzeichnungen zu erhalten und auszuwerten. Das

Programm BASEGRAIN nutzt die Photogrammetrie, um die Analysen mittels vertikal aufgenommenen Bildern durchzuführen. Auf einer grafischen Benutzeroberfläche können Nach- und Vorbearbeitungen vorgenommen werden, wobei die Hauptsache des Software-Codes ein fünfstufiger Algorithmus zur Objekterkennung ist. Dieser trennt Kornbereiche von Zwischenräumen und ermöglicht so die Ermittlung der Korngrößenverteilung (Detert & Weitbrecht, 2013).

Neben der Substratbeschaffenheit spielen für die Dynamik und Sukzession eines Gebiets auch Standortfaktoren eine Rolle. Ökosysteme reagieren oft proportional auf Störungen. Bei kleinen Ereignissen können sie kaum Auswirkungen auf den sich regenerierenden Lebensraum haben, während grössere das gesamte System verändern können. In beiden Fällen entwickeln sich meist neue stabile Zustände, die durch lokale Faktoren geprägt sind. Beispielsweise hängen die Auswirkungen von geomorphologischen Störungen von den lokalen topografischen Bedingungen ab (Gough et al., 2024), da steile Hänge oft von Instabilität geprägt sind. Hochgebirgslandschaften sind durch eine hohe ökologische Heterogenität geprägt, wobei geomorphologische Prozesse die Entwicklung der Lebensraumdynamik direkt beeinflussen (Eichel et al., 2023). Veränderte Niederschlagsmuster oder häufiger auftretende, klimatische Extremereignisse können beispielsweise die Art und Geschwindigkeit beeinflussen, wie sich Lebensräume nach Naturereignissen entwickeln (Gough et al., 2024).

### **1.3 Stand der Forschung**

Die Analyse der Korngrösse ist ein gut erforschtes und sich stetig weiterentwickelndes Gebiet, da ein Grossteil der festen Materie in der körnigen Form vorliegt und Kenntnisse, beispielsweise für die Herstellung von Verbrauchsgütern oder das Verständnis von Sedimentverfrachtung von Bedeutung sind (Batel, 1971). Da der Mensch heutzutage auch die Gebirgslagen besiedelt und so Naturereignissen nahezu alltäglich ausgesetzt ist (Topp, 1998), wird das Verständnis der dazugehörigen Prozesse von existenzieller Bedeutung (Rixen & Brügger, 2004). Daher gibt es mehrere Studien, die über die Auslösemechanismen oder das Fliessverhalten von Murgängen berichten. Li et al. (2024) berichten über die Morphologie von Murgangablagerungen, wobei es um die Dynamik des Ablagerungsprozesses geht. Die innere Reibung eines Murgangs kann durch eine grosse Anzahl von groben Partikeln erhöht werden, was die Ausbreitung der Ablagerung beeinträchtigt (Li et al., 2024). In Kombination mit der Korngrößenanalyse gibt es einerseits die Studie von Lanzoni et al. (2017). Sie untersucht die Geschwindigkeitsprofile in Murgangprozessen, basierend auf der Korngrößenverteilung. Experimentell wurden Parameter wie Wasserabfluss, Sedimentabfluss-, konzentration oder Fliess-tiefe untersucht (Lanzoni et al., 2017). Von Haas & Woerkom (2016) wurde andererseits weniger die Geschwindigkeit von Murgängen, sondern die Auswirkung von unterschiedlichen Korngrößen auf die Kolkbildung und Erosion erforscht. Die Korngrösse wurde dabei nicht als

entscheidender Einfluss auf die Erosion eingestuft, da die Scherspannung zur relevanten Krafteinwirkung beiträgt. Da diese Studien allesamt auf den Bewegungsprozess von Murgängen ausgelegt sind und sich diese Arbeit jedoch auf die Entwicklung einer stillstehenden Ablagerung bezieht, stellen sie hierfür keine Unterstützung dar.

Zur Entwicklung stillstehender Murgangablagerung wurde lediglich eine Studie gefunden, welche sich nicht auf die Korngrößenverteilung bezieht, sondern einen regenerierenden Lebensraum untersucht. Foster et al. (2020) schreiben über die Beobachtung der Erholung zweier Murgänge im südwestlichen Washington. Die betroffenen Bachrinnen wurden schon vor den Ereignissen untersucht, was die Gelegenheit bot, die Erholung des Ökosystems zu erforschen. Während sechs Jahren wurden die Bäche, deren Uferzonen, Bestände der Flora und Fauna sowie Wassertemperaturen detektiert und in Verbindung gebracht. Die wichtigste Erkenntnis war die rasche Wiederherstellung von Nahrungsnetzwerken, welche nach den Ereignissen fast vollständig ausgelöscht waren. Die Relevanz solcher Naturereignisse wurde von Foster et al. (2020) für die langfristige Produktivität und biologische Vielfalt, als wichtig eingestuft. Da aber die Erholungsrate standortspezifisch zu sein scheint, kann eine Zunahme solcher Störungen erhebliche langfristige Auswirkungen auf Ökosysteme haben (Foster et al., 2020). In diesen Ablagerungen wurde keine Korngrößenanalyse durchgeführt, wobei dieser Aspekt für die Vergleichbarkeit mit dem folgenden Forschungsansatz notwendig wäre.

#### **1.4 Ziel der Arbeit**

Es spiegelt sich eine Forschungslücke im Zusammenhang mit der natürlichen Sukzession des Lebensraums nach einem Murgangereignis, wobei diese Arbeit zur Schliessung dieser Lücke beitragen sollte. Das übergeordnete Ziel ist es, die Entwicklung anhand einer vorhandenen Datensammlung zu analysieren, wobei der untersuchte Lebensraum durch drei Merkmale charakterisiert wird; die Korngrößenanalyse gibt Information über das Substrat und die Oberflächeneigenschaften, während die Topografie die physikalischen, sowie mikroklimatische Bedingungen und die ökologischen Eigenschaften des Lebensraums kennzeichnen. Unter der Verwendung mehrerer Methoden werden die entsprechenden Daten generiert, berechnet und zusammengetragen, um einzelne Variablen auf statistische Korrelationen und Trendentwicklungen zu überprüfen. Es ergeben sich folgende Forschungsfragen:

- Wie beeinflusst die Korngrößenverteilung die strukturellen Eigenschaften der Murgangablagerung?
- Wie wirken sich topografische und mikroklimatische Faktoren auf den Lebensraum aus und gibt es dabei einen Zusammenhang zur vorhandenen Korngrösse?
- Welche räumlichen Muster lassen sich in Bezug auf die Korngrößen und die unterschiedliche Mächtigkeit der Ablagerung identifizieren?

- Wie kann die Sukzession der Murgangablagerung anhand der gesammelten Erkenntnisse beschrieben werden?

## 2 Untersuchungsgebiet

### 2.1 Nationalpark & Forschungsobjekt

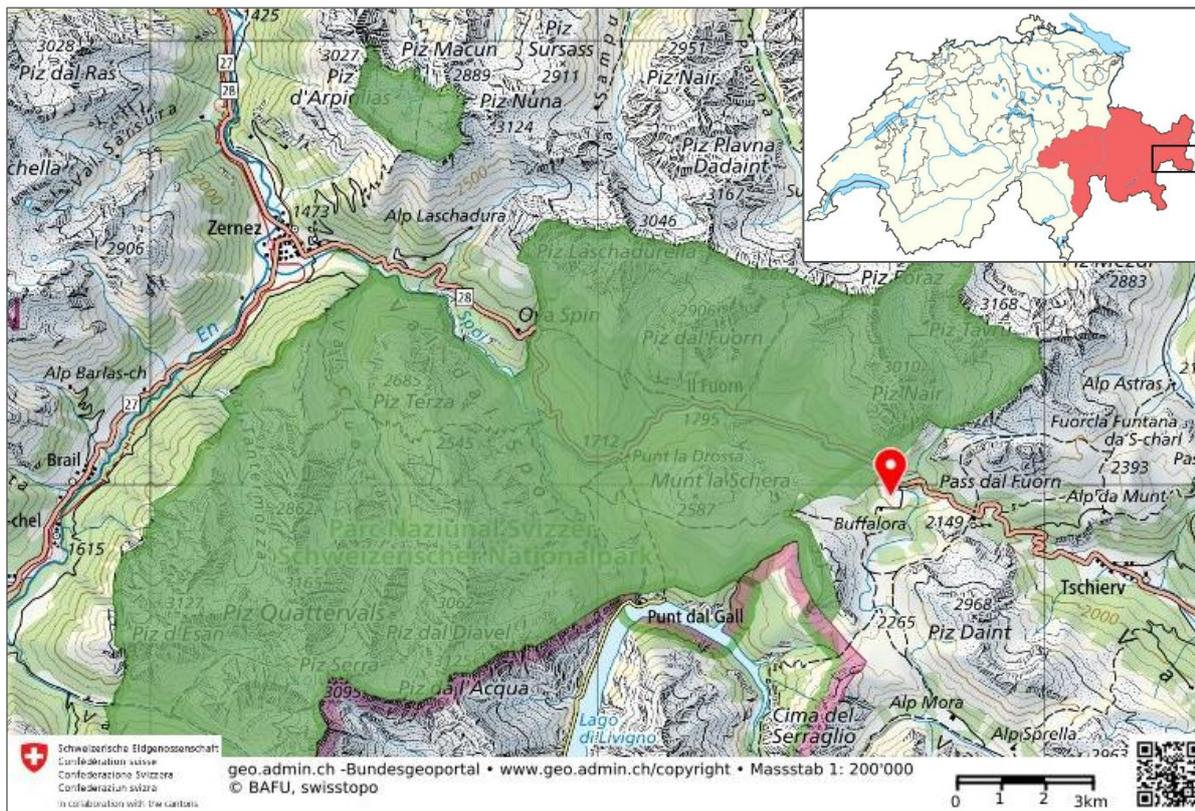


Abbildung 3: Übersichtskarte über das Untersuchungsgebiet. Grüne Markierung entspricht der Fläche des SNPs (Swisstopo, 2025). Übersicht des Standortes im Kanton Graubünden (Architectura, 2025).

In dieser Arbeit wird die Ablagerung eines Murgangereignisses im Gebiet Buffalora, nahe dem Ofenpass, untersucht. Wie auf der Übersichtskarte der Abbildung 3 ersichtlich, befindet es sich auf dem Gebiet der Gemeinde Zernez im Kanton Graubünden (2'816'902.30, 1'171'205.55 (CH1903+ / LV03)). Die untersuchte Murgangablagerung erstreckt sich über die offizielle Grenze des Schweizerischen Nationalparks und ist somit mindestens seit dessen Gründung ungestört von forstwirtschaftlichen Eingriffen oder Verbauungen. Nach Angaben des SNP (2025) befindet sich der Park zwischen dem Engadin und dem Val Müstair und liegt zwischen 1'400 und 3'174 Metern über Meer. Er erstreckt sich heute über eine Fläche von 170.3 km<sup>2</sup> und das Klima wird als trocken und rau, mit starker Sonneneinstrahlung und geringer Luftfeuchtigkeit beschrieben. Der Park wurde 1914 gegründet und ist neben dem ältesten Nationalpark der Alpen auch das grösste Wildnisgebiet in der Schweiz. Es ist ein Reservat der Kategorie 1a, was der höchsten Schutzklasse eines Wildnisgebiets entspricht und Tiere, Pflanzen sowie natürliche Prozesse vor sämtlichen menschlichen Eingriffen schützt (SNP, 2025).

Entsprechend eignet sich der Standort gut für die wissenschaftliche Untersuchung der Sukzession des Gebiets, da die Entwicklung längerfristig ungestört bleiben wird. Das Forschungsobjekt beinhaltet die gesamte Ablagerung und erstreckt sich über eine Länge von einem Kilometer und rund 350 Meter Höhendifferenz. Es wird durch die Definition von Stichprobendaten und die Erstellung von Luftbildern und Höhenmodelle analysierbar gemacht.

Im SNP kommt es laut Stolz und Huggel (2008) häufig zu Murgängen von unterschiedlicher Grösse und Art. Aufgrund der hohen wissenschaftlichen Aktivität bezeichnen sie den SNP und die zur Verfügung stehenden Datenbanken als wertvolle Grundlage. Sie charakterisieren die Murgänge im SNP nach der Klassifikation von Coussot und Meunier (1996) als granulare Art. Der Vergleich mit weiteren Murgängen im alpinen Raum zeigt, dass Murgangereignisse im SNP eher grobkörnig sind, was mit der geologischen Beschaffenheit des Untergrundes zusammenhängt (Stolz & Huggel, 2008). Nach der geologischen Karte (Geologie 500) von Swisstopo (2025) wird das Gestein des Piz Nair als in der Trias gebildeten „Hauptdolomit“ bezeichnet und der Untergrund der heutigen Murgangablagerung als „Hangschutt“. Deshalb wird angenommen, dass das untersuchte Ablagerungsmaterial aus Dolomit besteht, welcher in dem Zeitalter der Trias gebildet wurde.

## **2.2 Murgangereignis**

Nach Wipf et al. (2024) wurde am Nachmittag des 25. Juli 2022, durch lokalen und extremen Gewitterregen ein Murgang in Buffalora ausgelöst, welcher auf Wald, Infrastruktur und Strasse traf. Das Material löste sich am Piz Nair und transportierte Sedimente als Schlamm- und Geröllmasse über die Waldvegetation hinweg. Das Murgangereignis war insofern überraschend, als das sich in demselben Gebiet seit den letzten 130 Jahren kein vergleichbares Ereignis ergeben hat. Diese Zahl stammt von der Untersuchung des Alters von betroffenen und umliegenden Bäumen. Auch die Niederschlagssummen unterstützen diese Schätzung da die meteorologische Station Buffalora innerhalb von 60 Minuten 25.8 mm Niederschlag registrierte, und ein solches Ereignis nur alle 50-100 Jahre auftritt (Wipf et al., 2024). Aus diesem Grund wird das Einzugsgebiet des Piz Nair, welches das Material und die Energie für das Ereignis aufbrachte, als transportlimitiert klassifiziert. Womöglich befand sich das, für die Auslösung eines Murgangs benötigte Material, schon länger in dem Gebiet, aber da in der Zwischenzeit kein gleich starkes Niederschlagsereignis stattgefunden hat, wurde der Murgang bis zum Jahr 2022 nicht ausgelöst.

Nach Stolz & Huggel (2008) ist die Murgangaktivität im SNP relativ gross. Dies beinhaltet aber auch Murgangrinnen, welche regelmässig von Ereignissen solcher Art betroffen sind. Da die untersuchte Murgangablagerung in Buffalora ein – in relativ langer Zeitperiode – einmaliges

Ereignis darstellt, eignet es sich gut zur Untersuchung der langfristigen Entwicklung und Erholung des Gebietes.

## **2.3 Daten**

Die Daten, welche im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden, stammen aus Feldarbeiten, die durch den SNP veranlasst wurden. Er stellt sie dem Geografischen Institut der Universität Bern für diese Arbeit zur Verfügung. Die Daten dienen als Grundlage für diese Arbeit, weshalb sie mit der Themenfindung und der Eingrenzung dieser einhergehen. Das Datenpaket besteht aus unterschiedlichen Gruppen und Dateitypen. Es sind Datensätze, welche während mehreren Tagen Feldarbeit gesammelt und teilweise mit automatischer Messung von Sensoren generiert wurden.

### **2.3.1 Drohnenaufnahmen**

Mittels Drohnenbefliegung wurden ein digitales Höhenmodell (DSM) und ein digitales Geländemodell (DTM) berechnet, welche jeweils im TIF-Dateiformat vorliegen. Es wurde ein georeferenziertes Orthofoto erstellt, welches im selben Format erstellt wurde. Die Befliegung wurde in einem Report dokumentiert und dient neben der Erklärung der Vorgehensweise als Qualitätssicherung (Rossi, 2024).

### **2.3.2 Feldarbeit**

An vier Tagen im Juli und September 2023 sowie im August 2024 wurden während der Feldarbeiten Fotos gemacht. Es sind Fotografien von Plots enthalten, sowie einige von Sprösslingen, Ameisenhaufen, Detailaufnahmen vom Untergrund und verwüstete, beziehungsweise sich entwickelnde Landschaften (Rossi, 2024).

### 2.3.3 Fotos von Plots

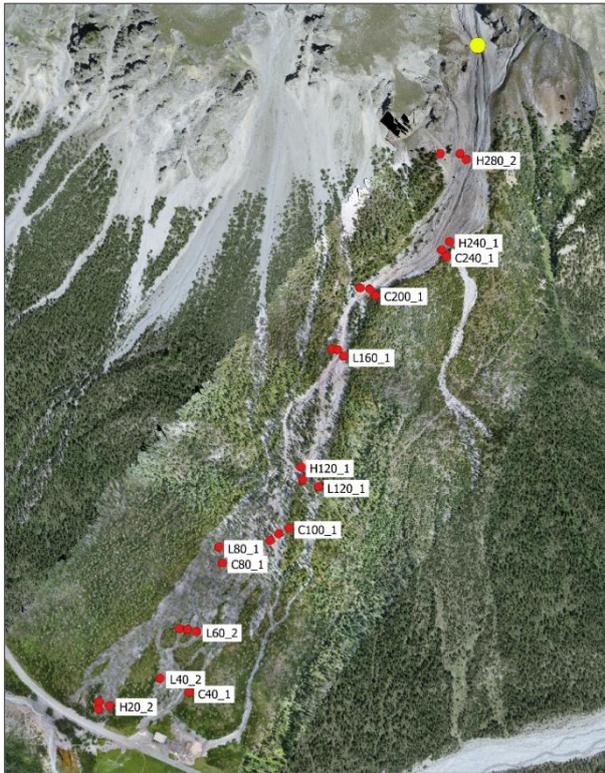


Abbildung 4: Übersicht Murgangablagerung mit Ortho-photo und Darstellung der beprobten Standorte.



Abbildung 5: Detailliertere Ansicht der Standorte auf der Höhenstufe 240.

Daten, welche zur Bestimmung der Korngrösse dienen, wurden ebenso im Zuge von Feldarbeit am 11.07.2023 und 21.09.23 generiert. Es handelt sich um Aufnahmen, die senkrecht zu Boden und verteilt auf zehn Höhenstufen der gesamten Murgangablagerung aufgenommen wurden. Die Zahlen in den Plot-Bezeichnungen repräsentieren die Höhe der Ablagerung, beginnend beim untersten Punkt der Ablagerung. Es sind jeweils mindestens Abstände von 20 Metern zwischen den einzelnen Stufen. Es handelt sich um eingemessene Plots, welche sich in der Ablagerungsdicke auf der jeweiligen Höhenstufe unterscheiden. Es wurden pro Höhenstufe drei Plots eingemessen, von welchen je einer als Kontrollfläche (C: neben der Ablagerung) diente, einer auf Untergrund mit wenig Ablagerungsmaterial (L: Ablagerungsmächtigkeit < 0.5 m), sowie einer auf einer mächtigen Ablagerungsschicht (H: Ablagerungsmächtigkeit > 1 m) platziert wurde. Insgesamt sind es somit 30 Bilder, von welchen einige doppelt vorliegen und einer neu platziert wurde, da die Markierungen weggeschwemmt wurden. Zur Übersicht dient die Abbildung 4. Der gelbe Punkt stellt den Ursprung des Materials dar, worauf im Kapitel 3.3 eingegangen wird. Pro Standort sind zwei rote Punkte eingezeichnet, wobei einer als Koordinationspunkt 1 und der diagonal gegenüberliegende Punkt des Plots als Koordinationspunkt 2 festgelegt und dargestellt wurde. Zur Veranschaulichung dessen, dient die Abbildung 5. Bei der Erstellung wurden als Referenzgrösse Massstäbe im 1 m \* 1 m Abstand in ein Quadrat gelegt, wobei an den rot eingezeichneten Punkten die Koordinaten sowie Höhenlagen

erfasst wurden. Zur Markierung und um die erneute Aufnahme derselben Standorte zu vereinfachen, wurden an den eingemessene Stellen Holzpflocke eingegraben. Einer davon diente zusätzlich als Halterung für den eingesetzten Temperatur- und Feuchtigkeitslogger (Rossi, 2024).

#### 2.3.4 Temperatur & Feuchtigkeit Logger

Pro Standort wurden während mindestens einem Jahr Daten zur Umgebungstemperatur, der Luftfeuchtigkeit und dem Taupunkt aufgezeichnet. Es handelt sich hierbei um stündlich gemessene Daten, wobei auch das Aufnahmedatum und der Zeitpunkt festgehalten wurden. In der dazugehörigen Textdatei wurde erwähnt, dass die Logger der Standorte H160, H280 und L20 nicht ausgelesen werden konnten und zwei weitere Logger fehlerhafte Daten aufzeigen. Die Zeitumstellung wurde in allen Datenreihen nicht berücksichtigt und liegen nur in Sommerzeit vor (Rossi, 2024).

#### 2.3.5 Vegetation

In einer EXCEL-Datei befinden sich detaillierte Angaben zu der Art und der Anzahl der einzelnen an den unterschiedlichen Standorten aufgenommenen Pflanzen (Rossi, 2024). Da dieser Datensatz für diese Arbeit nicht verwendet wird, wird nicht weiter auf die Inhalte dessen eingegangen aber für die Vollständigkeit dennoch aufgeführt.

#### 2.3.6 Weitere Datensätze

Für die Erstellung der Abbildungen 4 und 5 wurden die Daten der „Drohnenaufnahmen“ in das Programm QGIS (Version 3.16) eingelesen und verarbeitet. Als Hintergrundbild wurde ein Luftbild der Schweiz per WMS-Layer (Web-Map-Service) in QGIS geöffnet. Es handelt sich dabei um das Luftbild mit dem Namen „SWISSIMAGE Hintergrund“.

## 3 Methoden

### 3.1 Literaturrecherche

Mittels Literaturrecherche, welche das Zusammentragen von Informationen aus entsprechenden Studien, Papern, Büchern und Zeitschriften beinhaltet, wurde die Einleitung in das Thema und der aktuelle Stand der Forschung verfasst. Für die Interpretation der Ergebnisse und die kritische Beurteilung der Methoden wird auf die Literatur, deren Hinweise und Inhalte Bezug genommen.

### 3.2 BASEGRAIN

Mit den im Kapitel 2.3.3 beschriebenen Daten der Plot-Fotos wurde eine Korngrössenanalyse durchgeführt. Dazu werden nach Schreiber und Herpin (1992) die Korngrösse und Kornverteilung eines Gemisches quantitativ gekennzeichnet. Zwei unterschiedliche Darstellungsformen können für die Korngrössenverteilungen verwendet werden. Die Summenfunktion wird durch Kumulation der absoluten Häufigkeiten aufgebaut, wobei die Häufigkeitsfunktion als graphisch erste Ableitung der Summenfunktion gilt (Schreiber & Herpin, 1992). Zur Durchführung wurde das Werkzeug BASEGRAIN eingesetzt. Nach Detert und Weitbrecht (2013) handelt es sich hierbei um einen von der ETH Zürich entwickelten Software-Code, welcher mittels Photogrammetrie eine Korngrössenanalyse ermöglicht. Der Code basiert auf MATLAB und wird dem/der Benutzer:in nicht zur Verfügung gestellt. Die Anwendung ist dennoch frei zugänglich und ermöglicht die Ermittlung der Korngrössenverteilung ohne eine klassische Laborsiebung durchzuführen. Durch einen digitalen Objekterkennungsalgorithmus werden die Kornbereiche der obersten Sedimentschicht von den Zwischenräumen getrennt. Es werden Flächeninformationen entwickelt, welche eine Klassifizierung der Korngrössen ermöglichen. Es besteht die Möglichkeit, die Korngrössenverteilung des Untergrundmaterials abzuschätzen (Detert & Weitbrecht, 2013). Jede Abbildung einer Draufsicht, welche Steine enthielt, wurde in BASEGRAIN eingelesen, zugeschnitten, skaliert und nach einer teilweise manuellen Bestimmung der Parameter mittels fünf Erkennungsschritten analysiert.

Im ersten Schritt werden eindeutige und mögliche Zwischenräume unter der Anwendung eines doppelten Graustufenschwellenansatzes bestimmt. Die möglichen Zwischenräume werden bestätigt, sofern sie mit den Eindeutigen verbunden sind. Um Zugang zu weiteren möglichen Zwischenräumen zu erhalten, wird im zweiten Schritt eine morphologische Bottom-Hat-Filterung durchgeführt. Es wird mit dem ersten Schritt verknüpft berechnet, welche weiteren Zwischenräume als solches identifiziert werden. Im dritten Schritt werden zur Erkennung von schwachen und starken Kanten zwei Gradientfiltertechniken angewendet. Ausserdem werden die zuvor bestimmten Zwischenräume geglättet, bevor der Schwerpunkt der Berechnung im vierten Schritt zur Trennung von Einzelkornbereichen wechselt. Ein Wasserscheidealgorithmus wird zur Verbindung mehrerer kleiner Körner, die als einzelnes Korn detektiert werden sollten, angewendet. Es werden Wasserscheidebrücken erzeugt, wodurch schwache Kanten bestätigt werden. Für die abschliessende Operation ist der fünfte Schritt notwendig, da die entsprechenden Flächen an die Objektbereiche angepasst werden (Detert & Weitbrecht, 2013). Alle Parameter der Arbeitsschritte können von der/dem Benutzer:in angepasst werden, wobei markiert ist, welche einen bedeutenden Einfluss auf das Endresultat haben. Die entsprechend angepassten Parameter zu den jeweiligen Bildern sind im Anhang in der Datensammlung Nr. 1 aufgelistet.

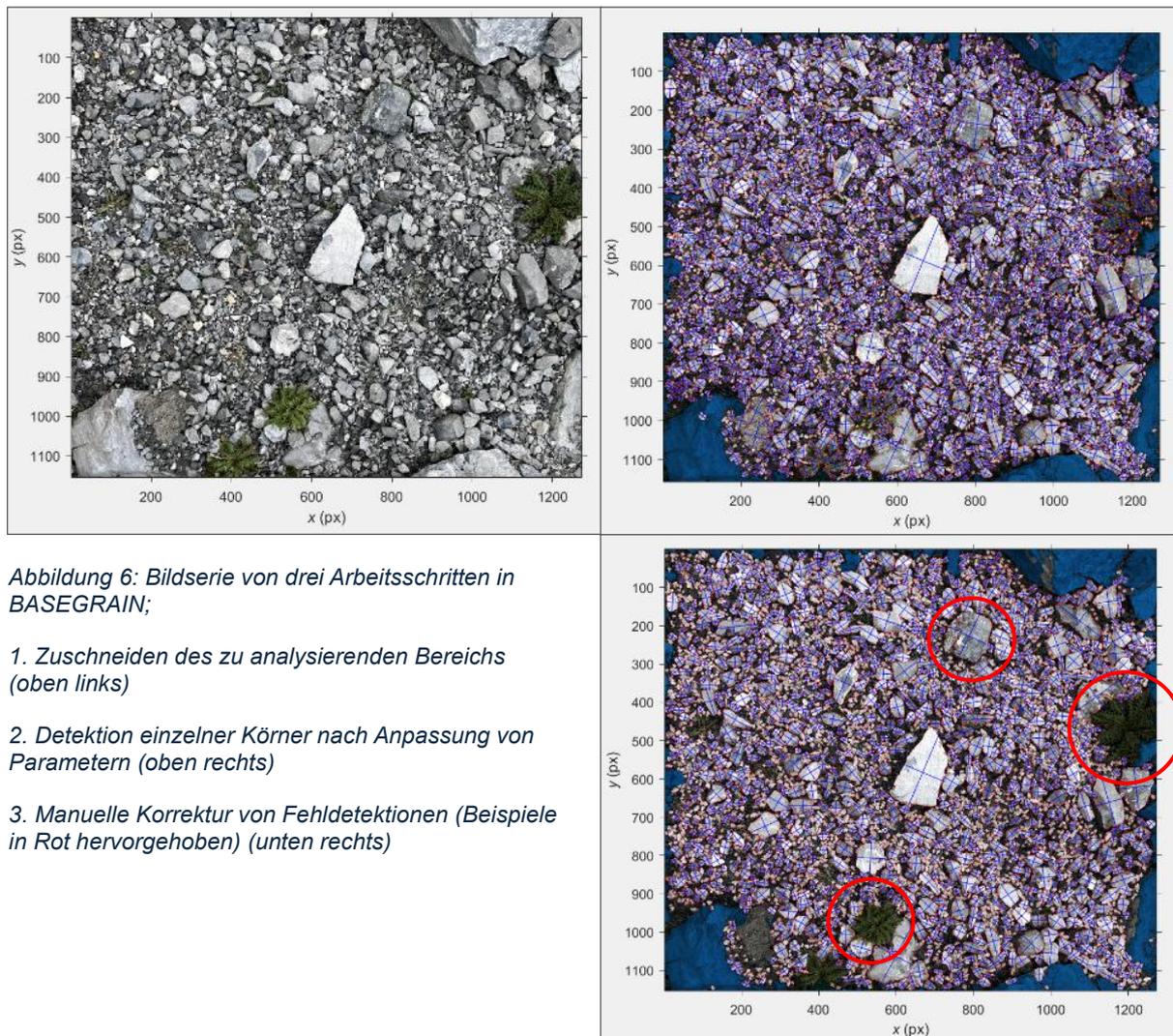


Abbildung 6: Bildserie von drei Arbeitsschritten in BASEGRAIN;

1. Zuschneiden des zu analysierenden Bereichs (oben links)
2. Detektion einzelner Körner nach Anpassung von Parametern (oben rechts)
3. Manuelle Korrektur von Fehldetektionen (Beispiele in Rot hervorgehoben) (unten rechts)

Die analysierten und klassifizierten Bilder wurden manuell überprüft und nach Bedarf korrigiert, da BASEGRAIN nicht alle Körner fehlerlos detektiert. Abbildung 6 dient der Veranschaulichung dieses Arbeitsschrittes. Die Änderungen werden in derselben Parameterdatei aktualisiert, so dass sie zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgerufen werden können. Die Summenkurve des jeweiligen Bildes, sowie die berechneten Flächen-, Achsen- und weitere Kennwerte können als Grafik und Excel-Datei exportiert werden. Für die Berechnung und die Analyse der Daten wurden für diese Arbeit die Flächenangaben sowie die von BASEGRAIN generierten Korngrößen verwendet. Zur Berechnung von statistischen Kennzahlen wurden die Werte aller b-Achsen (in Millimeter) der einzelnen Körner verwendet. Um aufzuzeigen, wie die Korngrößenwerte in der Analyse gewichtet werden können, wurde mit den von BASEGRAIN generierten Flächenangaben berechnet, wieviel Fläche des analysierten Bildes als Korn detektiert wurde. Diese Variable wird im weiteren Verlauf als „Anteil Steine“ bezeichnet. Die relevanten Daten wurden in Excel-Tabellen transferiert und für die quantitative Datenanalyse aufgearbeitet.

### **3.3 QGIS**

Mit dem Kartendarstellungsprogramm QGIS wurden zusätzliche Werte generiert. Zunächst wurden die grundlegenden Rasterlayer „SWISSIMAGE Hintergrund 318“ und das georeferenzierte Orthofoto der Ablagerung in das Programm eingefügt und dem Koordinatenbezugssystem „EPSG: 2056 – CH1903+/LV95“ zugewiesen. Nach dem Einlesen der Standortkoordinaten und deren Darstellung (Abbildung 4) wurden zwei Distanzvariablen berechnet. Zum einen die Distanz jedes einzelnen Punkts zur Quelle des Materials, wozu ein Punkt oberhalb der Ablagerung als solche definiert wurde (gelber Punkt in der Abbildung 4). Hierfür wurden für alle Standorte dieselbe Quelle verwendet. Auch wurde die Distanz des jeweiligen Standortes zur ungestörten Fläche gemessen – an den Kontrollstandorten entsprechend die Distanz zum Ablagerungsrand. Dazu wurde ein Polygon erstellt, welches die visuell erkennbare Ablagerung umfasst, sodass die Distanz jedes Standortes zum Rand gemessen werden konnte. Zur Vereinfachung wird diese Datenreihe im weiteren Verlauf „Distanz zur Ablagerung“ benannt.

Für die Generierung von Neigungswerten pro Standort wurde das DTM als weiterer Rasterlayer in QGIS eingelesen und daraus eine Neigungskarte erstellt. Die resultierenden Werte wurden manuell in die entsprechende Excel-Tabelle übertragen. Es wurde das DTM verwendet, da im Höhenmodell die Murgangablagerung geglättet ist. Das DSM beinhaltet auch Bäume, grobe Blöcke oder andere Objekte an der Oberfläche, welche die Neigungswerte verfälschen würden.

### **3.4 Excel**

Für die Analyse der Korngrößenverteilung wurden in Microsoft Excel mittels den entsprechenden Daten Kennzahlen berechnet. Sie umfassen den Mittelwert, das Minimum und Maximum der jeweiligen Korngrößen eines Bildes, sowie Quantile, die Schiefe und die Wölbung der Verteilung. Für den Vergleich wurde mit dem Quantil 16 und Quantil 84 gearbeitet da diese Kennzahlen nach den Studien von Folk & Ward (1957) in der Sedimentologie als standardisierte Größen festgelegt wurden. Sie passen sich besser an die logarithmische Normalverteilung an, als die klassischerweise verwendeten Quartile 25 und 75. Mittels dieser Datensammlung konnten vergleichende, analysierende und in Zusammenhang bringende Grafiken erstellt werden, welche die Untersuchung der berechneten Korngrößenverteilung und der Messdaten – importiert von QGIS – ermöglicht.

Die Loggerdaten zur Temperatur und Feuchtigkeit an den jeweiligen Standorten wurden ebenso in Excel aufbereitet. Dies beinhaltete das Einlesen aller Daten in entsprechende Excel-Tabellen, die Vereinheitlichung der Messperioden, sowie die Berechnung des Maximum und Minimum. Die Messperioden hatten meist denselben Beginn (11.07.2023, 17:00 Uhr), aber unterschiedliche Endzeitpunkte. Bis auf die Messperioden der Standorte mit der Bezeichnung

L200 und L240, welche eine deutlich kürzere Datenreihe aufweisen, wurden alle Endzeitpunkte auf dasselbe Datum gekürzt (15.08.2024, 10:00 Uhr). Die Logger konnten an einigen Standorten nicht ausgelesen werden oder detektierten fehlerhafte Werte. Zur Datenanalyse wurden die betroffenen Datenreihen deshalb ausgeschlossen. Es handelt sich hierbei um die Standorte H160, H280, L20, L60 und L100. Die Information, welche Logger fehlerhaft sind, wurde aus dem entsprechenden Readme des Datenpaketes entnommen. Mittels aller Daten konnten statistische Anwendungen wie die Darstellung von Boxplots, Scatterplots oder Kurvendiagrammen zur Beantwortung der Fragenstellungen verhelfen. Die Überprüfung der Zusammenhänge erfolgte per visueller Einschätzung, der Erstellung von Trendlinien oder der Berechnung von Korrelationskoeffizienten. Relevante und sichtbare Zusammenhänge werden im folgenden Kapitel aufgelistet und erklärt.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Datenanalyse

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse der Datenauswertung, nach Abschluss des im Kapitel 3 erklärten Vorgehens, beschrieben. Im Anhang befindet sich der Datensammlung (Nr. 2), auf welchen die behandelten Grafiken beruhen.

#### 4.1.1 Gewichtung einzelner Datenpunkte

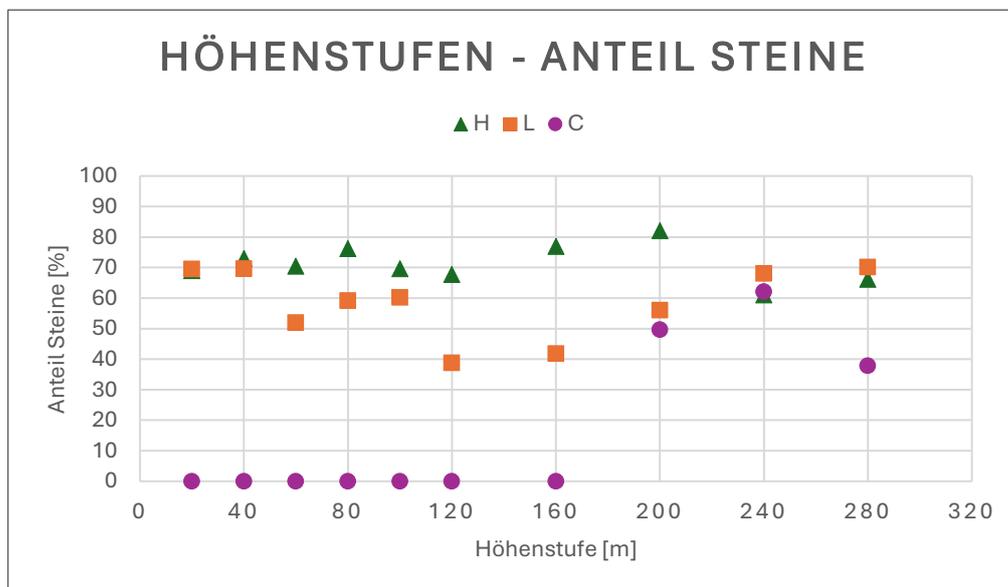


Abbildung 7: Prozentanteil der Flächen an Steinen im analysierten Bild pro Standort und Höhenstufe.

In der Abbildung 7 ist veranschaulicht, wie viel Prozent der Fläche jedes analysierten Bildes an den Standorten der jeweiligen Höhestufe, von Steinen bedeckt ist. Für die Bilder der Datenreihe mit der mächtigen Ablagerungsschicht (H) gibt es tendenziell höhere Werte, was im

Gegensatz zu denjenigen der niedrigen Ablagerungsschicht (L) für eine geschlossene Gesteinsdecke spricht. Die Datenreihen der Standortgruppen H und L beziehen sich in allen Ergebnissen auf zehn Standorte (Ausnahmen bei Loggerdaten durch fehlerhafte Messung). Da sieben von zehn Bildern an den Kontrollstandorten (C) keine Steine enthalten und so nicht auf die Korngrößen untersucht werden konnten, handelt es sich im Folgenden um lediglich drei Datenpunkte. Für die Beobachtungen und Resultate wird die Datenreihe C wegen der kleinen Anzahl nicht beachtet. Sie ist für die Vollständigkeit und Übersicht dennoch in den jeweiligen Grafiken enthalten.

#### 4.1.2 Statistische Untersuchung

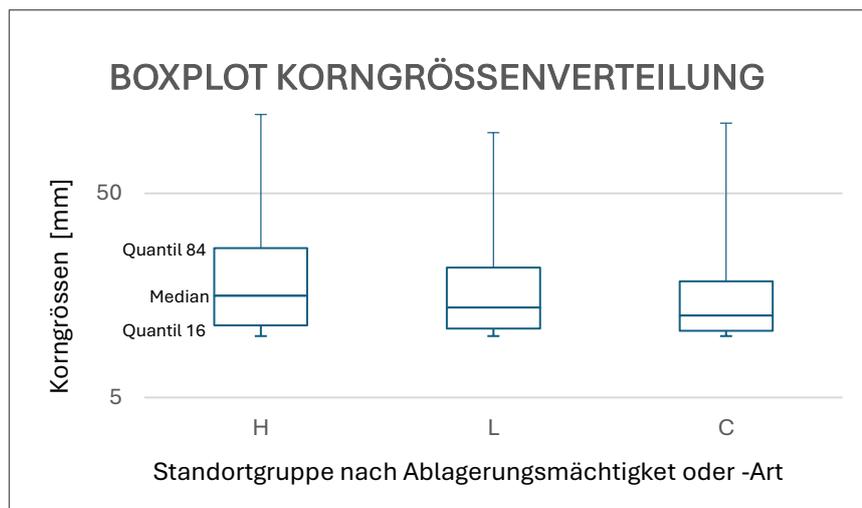


Abbildung 9: Kennzahlenvergleich der Korngrößenverteilungen. Y-Achse liegt als logarithmische Skala vor, damit Unterschiede besser ersichtlich sind. Die untere Abgrenzung steht für das Quantil 16 und die Obere für das Quantil 84. Die mittlere Linie bildet den Medianwert ab.

Die Boxplots ermöglichen den Vergleich von Kennzahlen der Korngrößenverteilung der unterschiedlichen Standortgruppen. Das Quantil 16 wird aufgrund der schlechten Vergleichbarkeit nicht in die Analyse miteinbezogen. Die Erklärung dazu folgt im Kapitel 5.2. Korngrößen sind bei der Standortgruppe der mächtigen Ablagerungsschicht (H) am grössten, was an dem höheren Medianwert (15.8mm) und Quantil 84-Wert (27mm) erkennbar ist. Auch die höchsten Maximalwerte von bis zu 121.7mm befinden sich in den Parzellen der mächtigen Ablagerungsschicht. Die Standorte mit der niedrigen Ablagerungsschicht (L) weisen tiefere Werte für den Median (13.8mm) und das Quantil 84 (21.7mm) auf. Der Maximalwert der Standortgruppe L beträgt 99.2mm und hat somit eine rund 30mm kürzere b-Achse als der Maximalwert der Standortgruppe H.

Tabelle 1: Wölbung der Korngrößenverteilung an den jeweiligen Standorten und deren Klassifikation.

Wölbung						
Höhenstufe	Standort H	Klassifikation	Standort L	Klassifikation	Standort C	Klassifikation
20	1.167	lepto	0.908	meso		
40	1.092	meso	1.224	lepto		
60	1.046	meso	1.209	lepto		
80	0.915	meso	1.220	lepto		
100	1.107	meso	1.288	lepto		
120	1.204	lepto	1.281	lepto		
160	1.11	meso	1.401	lepto		
200	1.154	lepto	1.141	lepto	1.391	lepto
240	1.354	lepto	1.127	lepto	1.541	sehr lepto
280	1.234	lepto	1.235	lepto	1.685	sehr lepto

Die Wölbung beschreibt die Höhe und Spitzigkeit der Korngrößenverteilung und zeigt somit Informationen über die Streuung der Korngrößen an. Die Abkürzungen in der Tabelle 1 beschreiben, ob die Wölbung leptokurtisch (lepto), also eher hoch und spitzig oder platykurtisch, also eher eine niedrige Wölbung der Korngrößenverteilung aufweist. Die mittleren Werte werden der mesokurtischen (meso) Kategorie zugeteilt. Die Klassifikation stammt von Folk & Ward (1957). Die Standorte mit mächtigen Ablagerungsschichten (H) haben entweder mittlere oder leptokurtische Werte, was für eine eher geringe Streuung der Korngrößen spricht. Auch die Standorte mit einer dünnen Ablagerungsschicht (L) weisen fast ausschliesslich Werte in der leptokurtischen Kategorie auf. Die Kontrollstandorte (C) zeigen eine starke Tendenz zu einer geringen Streuung der Korngrößen auf. Dies deutet laut Klassifikation auf gut sortiertes Material hin.

Tabelle 2: Schiefe der Korngrößenverteilung an den jeweiligen Standorten und deren Klassifikation.

Schiefe						
Höhenstufe	Standort H	Klassifikation	Standort L	Klassifikation	Standort C	Klassifikation
20	0.127	fein	0.050	symmetrisch		
40	0.189	fein	0.030	symmetrisch		
60	0.178	fein	-0.171	grob		
80	-0.070	symmetrisch	0.108	fein		
100	0.177	fein	0.013	symmetrisch		
120	0.124	fein	-0.317	sehr grob		
160	0.081	symmetrisch	0.053	symmetrisch		
200	0.211	fein	-0.285	grob	-0.032	symmetrisch
240	-0.027	symmetrisch	-0.043	symmetrisch	0.115	fein
280	0.131	fein	0.132	fein	-0.128	grob

Die Schiefe beschreibt die Asymmetrie der Korngrößenverteilung und damit, ob sie eher feinkorn- oder grobkorndominiert ist. Bei positiver Schiefe wird die Verteilungskurve nach links, in den feinkörnigen Bereich verzerrt und wenn der Wert eine negative Schiefe aufweist, entsprechend nach rechts in den grobkörnigen. Nach der Klassifikation von Folk und Ward (1957) wurden die Werte in fünf unterschiedliche Kategorien von sehr fein- bis sehr grobkörnig eingeteilt. Die Schiefe sagt nichts über die durchschnittliche Korngröße aus, sondern beschreibt, ob feine oder grobe Körner häufiger vorkommen. Dies kann sich mit der generellen Korngrößenklassifikation überschneiden, muss aber nicht. Die Schiefe der mächtigen Ablagerungsschicht (H) enthält Probestandorte, welche in die Kategorien von feinkörnig bis symmetrisch eingeteilt werden. Dies deutet auf eine leichte Verzerrung in den feinkörnigen Bereich hin was bedeutet, dass feine Körner häufiger auftreten als grobe. Die dünnen Ablagerungsschichten (L) weisen Werte der Kategorien von feinkörnig bis sehr grobkörnig mit Tendenz einer Verzerrung nach rechts auf. Grobkörnige Steine kommen also tendenziell häufiger vor als feinkörnige. Die drei Kontrollstandorte (C) weisen drei unterschiedliche Kategorien auf, welche insgesamt für eine symmetrische Verteilungsfunktion sprechen.

### 4.1.3 Topografie

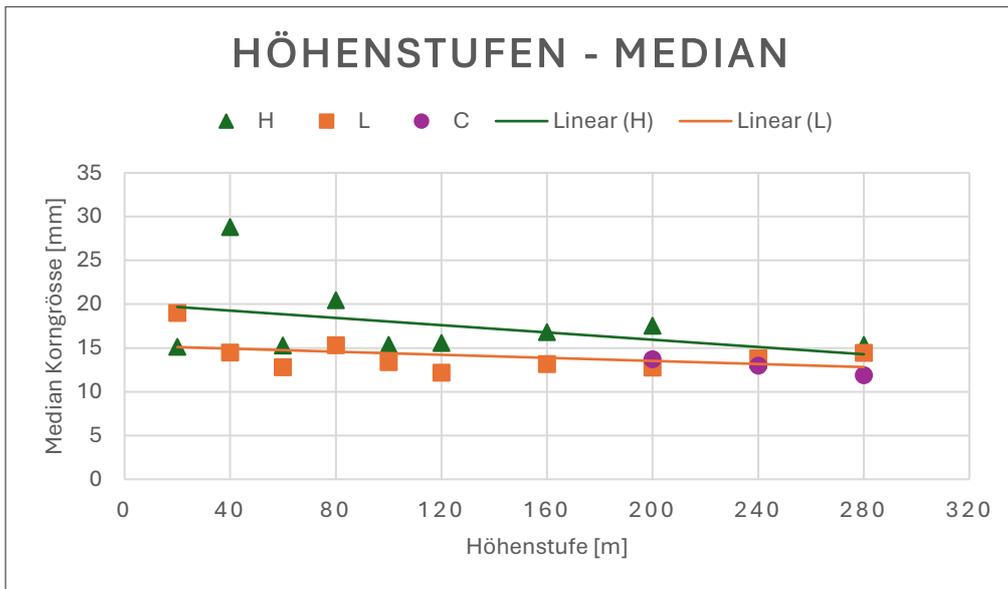


Abbildung 10: Median der Korngrösse nach Höhenstufe.

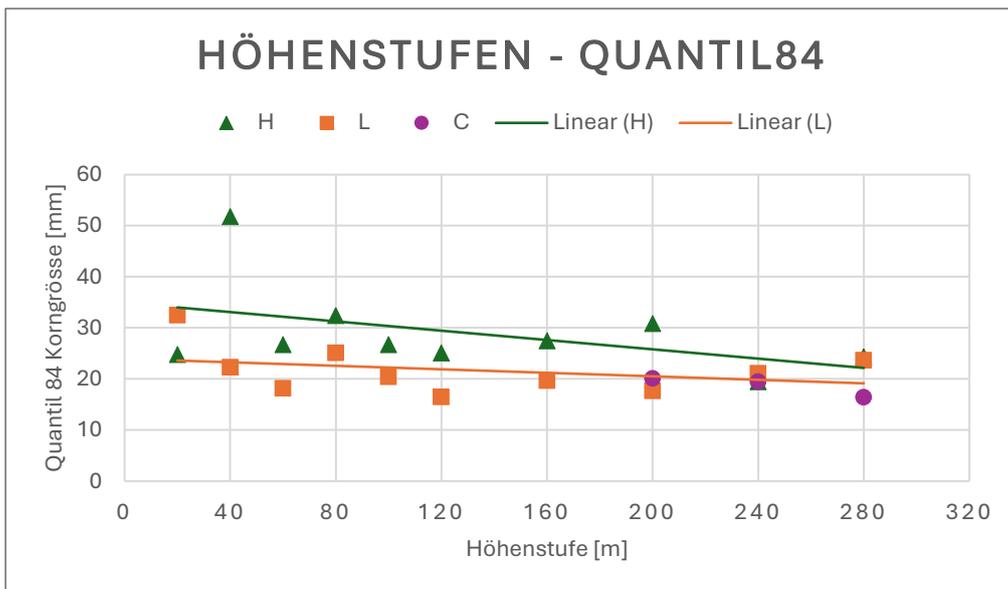


Abbildung 11: Quantil 84 der Korngrösse nach Höhenstufe.

Der Vergleich zwischen dem Median der Korngrösse und der Höhenstufe der jeweiligen Ablagerungsdicke ergibt die Grafik in der Abbildung 9. Die Variable der Höhenstufe ist analog zu den Standortbezeichnungen aufgeführt, weshalb die Höhe 0 m für das untere Ende der Murgangablagerung steht. Die Beprobung der Standorte erfolgte in Stufen von 20 m oder 40 m, weshalb die Abstände regelmässig zueinander sind. Das Streudiagramm widerspiegelt das Ergebnis der statistischen Quantile, welches in der Anwendung der Boxplots ersichtlich wurde; die Korngrössen der Datenreihe mit mächtigen Ablagerungsschichten (H) sind durchschnittlich grösser als diejenige der niederen Schichten (L). Die Trendlinien beider Datenreihen laufen in den höheren Schichten zusammen. Dieselbe Analyse wurde mit dem Quantil 84 der

Korngrösse anstelle des Medians durchgeführt (Abbildung 10), wobei der Verlauf der Trendlinien bis auf eine leicht erhöhte Differenz, identisch ist. Der leicht erhöhte Unterschied impliziert, dass die Differenzen der mächtigen (H) und niederen (L) Datenreihen mit dem Quantil 84 besser ersichtlich sind. Um die Unterschiede besser hervorzuheben, wird deshalb für die folgenden Ergebnisse mit dem Quantil 84 gerechnet.

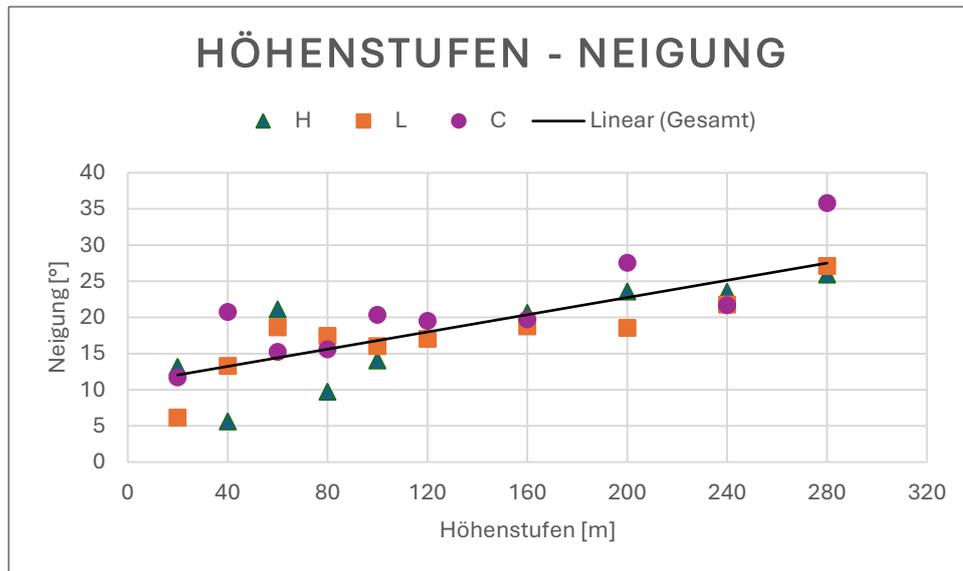


Abbildung 12: Neigungswinkel der Murgangoberfläche nach Höhenstufe des jeweiligen Standorts.

Die Gegenüberstellung der Neigungswerte der einzelnen Standorte und deren Höhenlage zeigt eine deutliche Richtung in der Entwicklung an. Höher gelegene Standorte weisen eine steilere Topografie auf, während die Gebiete in den tieferen Höhenstufen flachere Standorte beinhalten. Das Streudiagramm spiegelt das Profil des Hanges wider, auf welchem sich der Murgang abgelagert hat. Die sichtbaren Datenpunkte bilden keine Cluster, sondern sind entlang der unterschiedlichen Neigungswerte aufgereiht. Es gibt also keinen Neigungsgrad, welcher für die gesamte Murgangablagerung als charakterisierend bewertet werden könnte, er ist vielmehr variabel.

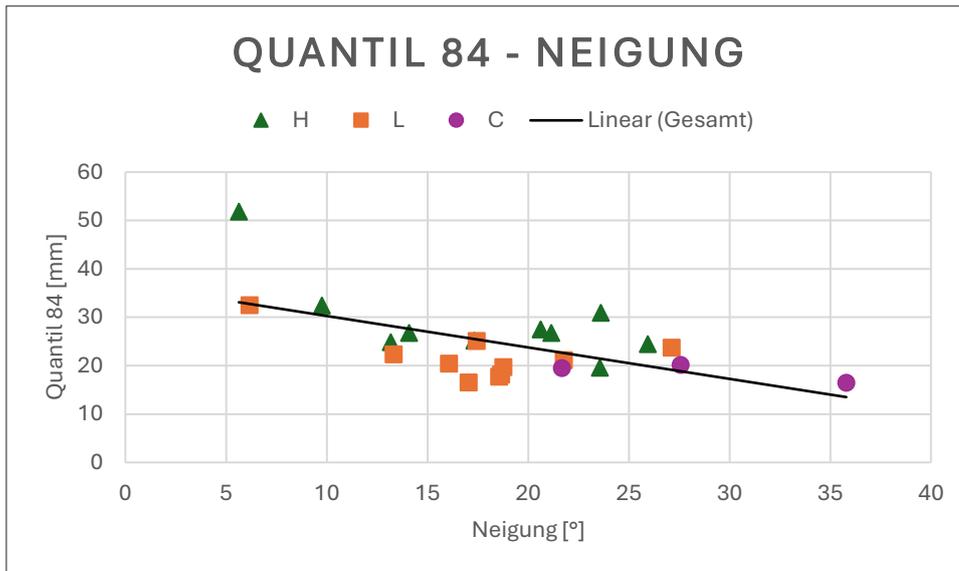


Abbildung 13: Quantil 84 der Korngröße nach Neigungswinkel der Murgangoberfläche an dem jeweiligen Standort.

Die Werte der Neigung wurden mit dem Quantil 84 der Korngrößen in Verbindung gebracht. Der Verlauf der einzelnen Datenpunkte und der Trendlinie zeigt im Streudiagramm einen deutlich negativen Trend. Zwischen den unterschiedlichen Mächtigkeitsstandorten (H) und (L) lässt sich keine Differenzierung feststellen. Dennoch erlaubt der Verlauf der Trendlinie die Erkenntnis, dass größere Steine in der flacheren Topografie abgelagert werden, während kleinere Korngrößen an steileren Hängen vorzufinden sind.

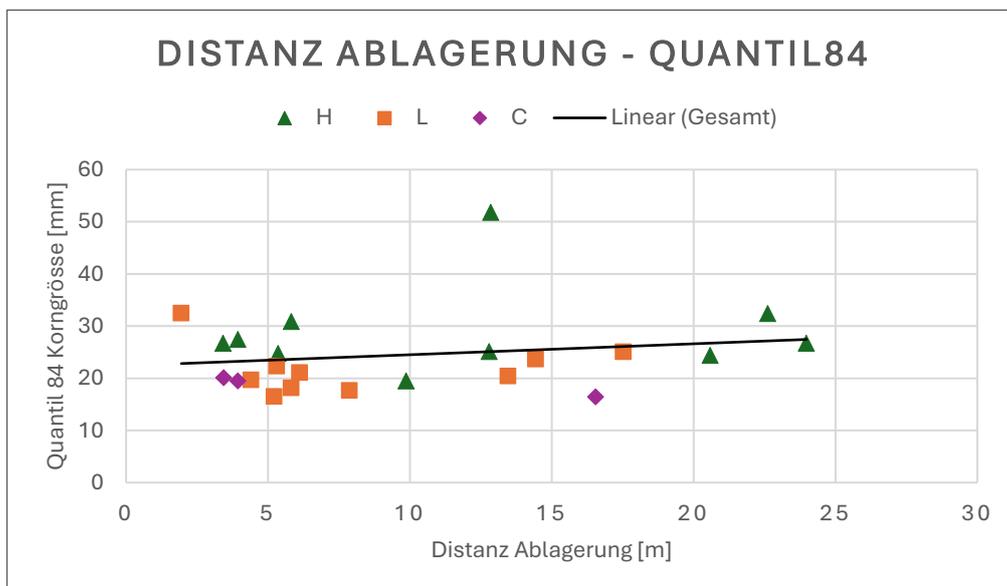


Abbildung 14: Quantil 84 der Korngröße nach der Distanz zum Ablagerungsrand an dem jeweiligen Standort.

Wie im Kapitel 3.3 beschrieben, wurde die Distanz der Standortprobe zum Rand der Ablagerung oder diejenige der Kontrollstandorte zur Ablagerung gemessen und in die Datenanalyse integriert. Sie wurde zur Überprüfung eines Zusammenhangs mit der Korngröße mit dem

Quantil 84-Wert in Verbindung gebracht. Ausser, dass viele Standorte in einer Entfernung zwischen 2.5 m und 7.5 m gesetzt wurden, kann durch die Datenpunkte keine Tendenz oder Entwicklungsrichtung erkannt werden. Die Trendlinie zeigt eine leichte Steigung mit der Entfernung vom Ablagerungsrand auf. Dies erlaubt die Vermutung, dass Korngrößen, welche weiter entfernt vom Rand liegen, eine grössere Korngrösse aufweisen. Der Datenpunkt der Datenreihe (L), welcher die kürzeste Distanz zum Rand hat, weist dennoch eher grössere Korngrößen auf.

#### 4.1.4 Loggerdaten Klima

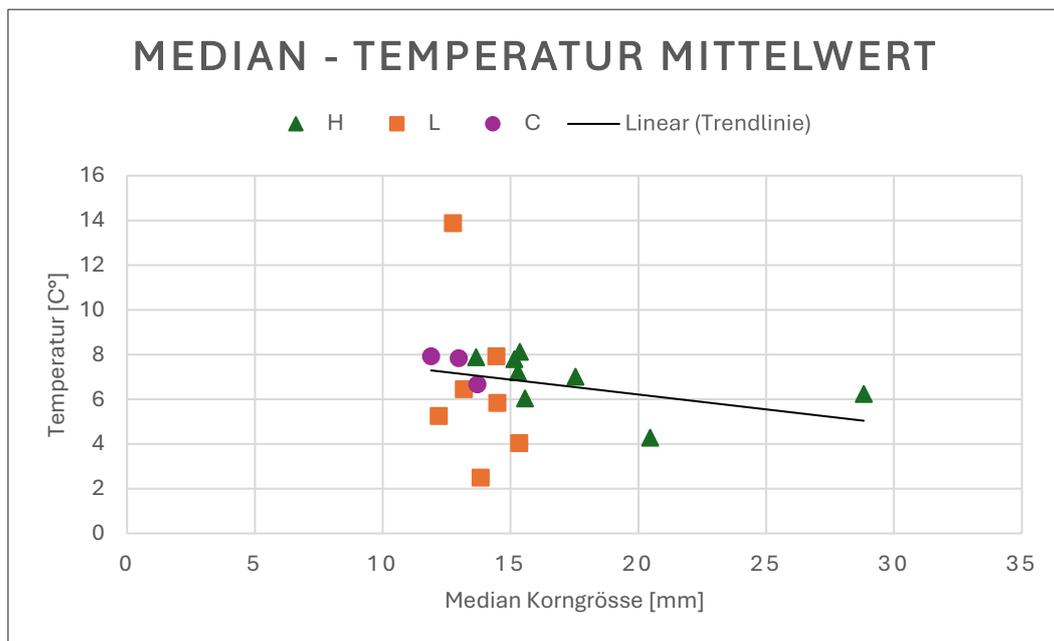


Abbildung 15: Mittelwerte der Temperaturmessung des Loggers nach dem Median der Korngrösse sortiert.

Die Abbildung 14 zeigt die Verknüpfung zwischen dem Median der Korngrösse und dem Mittelwert der gemessenen Temperatur. Die Trendlinie, welche für alle Daten gemeinsam erstellt wurde, zeigt einen leichten Negativtrend an. Dies spricht dafür, dass eine gröbere Korngrösse mit einer tieferen Durchschnittstemperatur verbunden ist, wobei der Trend von drei Ausreissern bestimmt wird. In der Diskussion wird näher auf diesen Inhalt eingegangen.

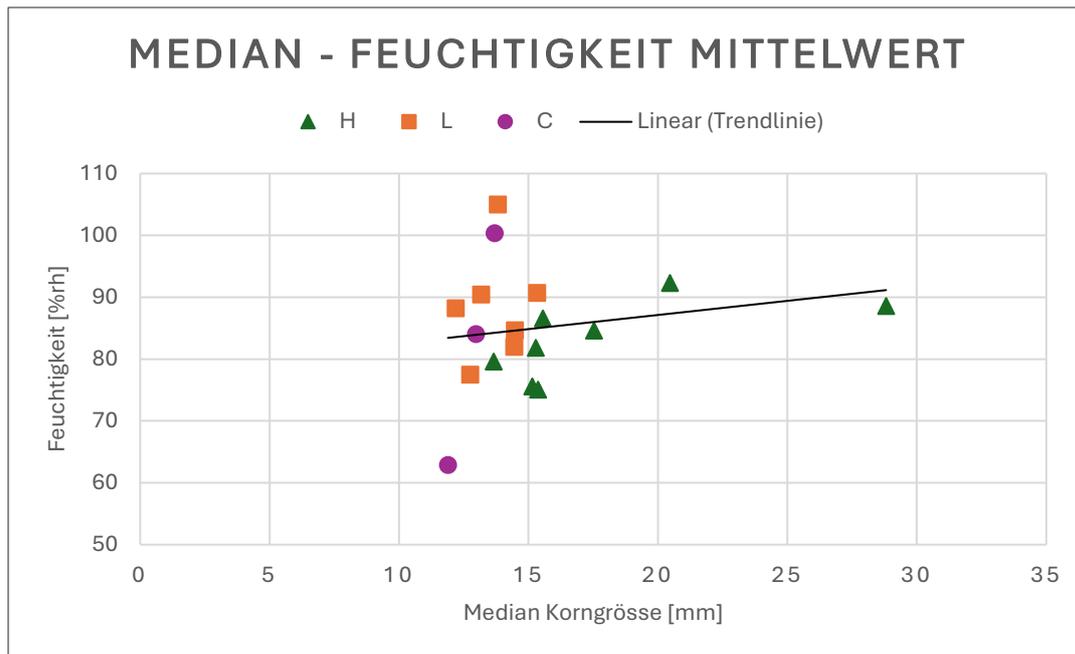


Abbildung 16: Mittelwerte der Feuchtigkeitsmessung des Loggers nach dem Median der Korngrösse.

In der Gegenüberstellung, der Untersuchung eines Zusammenhangs zwischen den Medianwerten der Korngrössen und den durchschnittlichen Feuchtigkeitsdaten ergibt sich die Abbildung 15. Die Trendlinie verläuft – anders als in der vorherigen Grafik – mit einer positiven Entwicklung. Die Aussage bezieht sich entsprechend auf höhere Feuchtigkeitswerte in Bereichen, welche eine grössere Korngrösse aufweisen.

Die Analogie der Abbildungen 14 und 15 deuten auf eine Korrelation der beiden Loggerdaten hin. Die Durchführung eines Pearson-Korrelationstest ergab für beide Variablen einen p-Wert von 0.00449. Der Wert ist deutlich kleiner als 0.05, was eine statistisch signifikante Korrelation der Temperatur- und Feuchtigkeitsmittelwerten beweist. Die gegenteilige Richtungsentwicklung der Trendlinien ist insofern nachvollziehbar, als dass warme Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann und so die relative, gemessene Feuchtigkeit kleiner wird.

#### 4.1.5 Weitere durchgeführte Tests ohne Aussagekraft

Für die Prüfung der zusammenhängenden Variablen wurden weitere Grafiken erstellt und betrachtet, welche in diesem Kapitel nicht im Detail behandelt werden. Sie weisen keine erkennbaren Zusammenhänge, Korrelationen oder Clusterbildungen auf, weshalb sie für die Diskussion irrelevant sind. Für die Vervollständigung und zur Übersicht befindet sich im Anhang (Nr. 3) eine Grafiksammlung von geprüften Zusammenhängen. Darin enthalten sind die folgenden Variablen, welche auf ihre gegenseitigen Beziehungen geprüft wurden:

Tabelle 3: Zueinander verglichene Variablen ohne Aussagekraft oder nachweisbare Korrelation.

Anteil Steine im untersuchten Bild	Quantil 84 der Korngrösse
Anteil Steine im untersuchten Bild	Distanz zum Ablagerungsrand
Distanz zur Materialquelle (gelber Punkt)	Quantil 84 der Korngrösse
Median der Korngrösse	Schiefte der Korngrösse
Höhenstufe	Schiefte der Korngrösse
Höhenstufe	Wölbung der Korngrösse
Distanz zum Ablagerungsrand	Schiefte der Korngrösse
Distanz zum Ablagerungsrand	Wölbung der Korngrösse
Neigung der Ablagerung	Schiefte der Korngrösse
Neigung der Ablagerung	Wölbung der Korngrösse
Neigung der Ablagerung	Distanz zum Ablagerungsrand
Höhenstufen & Anteil Steine	Temperaturdaten Maximum & Minimum
Höhenstufen & Anteil Steine	Feuchtigkeitsdaten Maximum & Minimum

## 4.2 Übersicht der Ergebnisse

Die Prozentanteile der durch Steine bedeckten Fläche der Standorte, zeigt eine dichtere Bedeckung bei den mächtigen Ablagerungsschichten (H) auf. Die Korngrößen sind in diesen Schichten insgesamt grösser, dennoch wurden häufiger feine Partikel detektiert. Die niedrigen Ablagerungsschichten (L) sind besser sortiert und weisen trotz feinerer Korngrösse, häufiger detektierte Körner mit grossem Durchmesser auf. Die Ablagerung wird in den höher gelegenen Lagen steiler und enthält feinere Körner als in flacheren Gebieten. Der Vergleich der Korngrößen mit den Loggerdaten ergibt einen Trend, welcher grosse Körner mit niedriger Temperatur und erhöhter Feuchtigkeit in Verbindung bringt, wobei die Aussagekraft infrage gestellt wurde.

## 5 Diskussion

Die Ergebnisse aus der Korngrößenanalyse, den topografischen Messungen sowie den mikroklimatischen Variablen bieten eine vielseitige Grundlage, die zum Verständnis der zusammenhängenden, physikalischen Prozesse beitragen. Nach der Interpretation der Erkenntnisse, werden sie im Kontext geomorphologischer Prozesse diskutiert und die verwendeten Methoden kritisch beurteilt. Anschliessend werden die Inhalte in den wissenschaftlich fundierten Kontext eingebettet.

## 5.1 Interpretation der Ergebnisse

### 5.1.1 Anteil Steine

Die insgesamt Fläche der Bedeckung durch Steine des analysierten Bildes gibt Hinweise darauf, wie die detektierten Korngrößen für die Analyse gewichtet werden können. Die Analyse kann unabhängig von der Anzahl der detektierten Steine durchgeführt werden, wobei die



Abbildung 17: Beispiel für Kontrollstandort mit 100% Vegetationsbedeckung, Standort C100 (Rossi, 2024).

Daten bei einem kleinen Anteil der Fläche weniger repräsentativ sind, weil sie sich auf eine kleinere Probenmenge beziehen. An allen Standorten, welche für die Untersuchung relevant sind (falls Körner in der Probe ersichtlich sind), wurde ein Maximalbereich von 1m<sup>2</sup> beprobt. Wenn sehr wenige Steine im Bild detektiert wurden, deutet dies darauf hin, dass der Rest der Fläche von entweder zu kleinen Körnern, Vegetation, oder nicht als Korn identifizierbaren Untergrund – also Erde, Bodenmaterial oder Festgestein – ausgefüllt ist. Dass die Kornanteile in den mächtigen Ablagerungsschichten (H) tendenziell höhere Werte aufweisen, ist insofern nachvollziehbar, als dass eine Mächtigkeit von 1m oder grösser für eine geschlossene Gesteinsdecke spricht. Randproben oder solche mit grundsätzlich weniger Ablagerungsmaterial auf der Probefläche (L) können so dünn sein, dass der Untergrund hervorkommt. Auch haben Pflanzen, welche durch den Murgang zwar verschüttet, nicht aber abgestorben sind, bessere Chancen, die Störung zu überleben. Auch das erneute Wachstum von Pflanzen ist auf diesen Flächen begünstigter als auf mächtigen Ablagerungsschichten, da Samen näher am nährstoffreichen Boden sind und dennoch die zum Wachstum notwendige Licht-, Luft- und Wasserverfügbarkeit gewährleistet ist (Luzuriaga et al., 2005).

Mittels Betrachtung der Bilder aus den Fotoplot-Daten wird deutlich, dass die Kontrollstandorte für die Korngrößenanalyse nicht ideal gewählt wurden (Abbildung 16). Die drei Kontrollstandorte der höchstgelegenen Lagen (C140, C160 und C180) enthielten Steine, weshalb die entsprechenden Werte in den Grafiken abgebildet wurden. Da der Mangel an vergleichbaren

Standorten dieser Gruppe markant ist, wird die Datenreihe von der Analyse ausgeschlossen. Die Grafik wirft die Frage auf, weshalb an keinem Standort mehr als 82% der Fläche als Gesteinsoberfläche detektiert wurde. Einerseits gab es in allen beprobten Bildern einen Anteil an lebender oder abgestorbener Vegetation (Tannennadeln, Äste, Laub, ...), andererseits sind alle Körner durch Zwischenräume voneinander getrennt, welche die fehlenden 18% an detektierter Fläche erklären. Die Zwischenräume sind möglicherweise auch mit Körnern gefüllt, wurden aber nicht als solche detektiert da nur vollständig sichtbare Körner in die Analyse miteinbezogen wurden. Dies gilt auch für Körner, die am Rand der analysierten Bildfläche liegen. Nach Detert & Weitbrecht (2013) wurden sie zur Verhinderung einer Übersegmentation nicht in die Berechnung miteinbezogen.

### 5.1.2 Statistische Kennwerte

Die statistischen Kennwerte der Quantile geben in einem Boxplot dargestellt einen guten Überblick über die Korngrößenverteilung der unterschiedlichen Standortgruppen. Über alle Proben sind die Werte der Standortgruppe mit den mächtigen Ablagerungsschichten (H) am grössten, wobei es massgeblich um den Median, das Quantil 84 und den Maximalwert geht. Die Fotos der Proben wurden ein Jahr nach dem Murgangereignis aufgenommen, weshalb ein ganzer Jahreszyklus von Erosionsprozessen auf die Ablagerungsoberfläche einwirkte. Niederschlagsereignisse, Schneeschmelze oder Windabtragung beeinflussen die Ablagerung insofern, als dass sie kleine, leichte Körner in die unteren Schichten oder in tiefer gelegene Höhenstufen der Ablagerung transportieren (Hübl & Kienholz, 2006). Dies erklärt den Mangel an kleineren Korngrößen, was sich in den Werten der Wölbung widerspiegelt. Sie wird in den mächtigen Ablagerungsschichten (H) als weder extrem spitz noch flach kategorisiert, jedoch mit der leichten Tendenz zu einer spitzen Wölbung. Dies spricht für eine eher geringe Streuung, was wiederum eine gute Sortierung des Ablagerungsmaterials impliziert. Nach VanDine (1996) enthalten Murgangablagerungen meist schlecht geschichtetes und sehr schlecht sortiertes Material, was die Interpretation infrage stellt. Die Anwendung der Photogranulometrie als Instrument zur Korngrößenanalyse, erfasst lediglich Daten der Ablagerungsoberfläche und erlaubt nur eine grobe Abschätzung des Materials, welches unterhalb der obersten Steinschicht liegt. Durch die Einwirkung der bereits genannten Erosionsprozesse ist es also möglich, dass die obersten Lagen der Ablagerung von den kleineren Korngrößen getrennt wurden, was eine Beeinträchtigung der Repräsentativität von den Proben bedeuten würde.

Die Standortgruppe mit dünneren Ablagerungsschichten (L), haben in allen drei Kennzahlen, dem Quantil 16, dem Median und dem Quantil 84, niedrigere Werte als die Standortgruppe (H). Einerseits handelt es sich dabei um Randablagerungen, welche aufgrund der geringeren Transportkapazität, während des Ablagerungsprozesses kleinere Steine enthalten könnten. Auch könnte es sich hierbei um jene Steine handeln, welche mittels Erosionsprozesse aus den mächtigeren Schichten ausgewaschen wurden. Andererseits gibt es Probestandorte mit

dünnen Schichten, welche mitten in der Ablagerungsfläche liegen. Möglicherweise handelt es sich hierbei um seitliche Standorte von Loben oder den Untergrund von neu gebildeten Gerinnekanälen. Diese Vermutung erfolgt durch die visuelle Beurteilung (QGIS-Darstellung) sowie der Verknüpfung, dass andere Standorte mittig der Ablagerung eine mächtigere Schicht als maximal 0.5m hätten. Auch in der Standortgruppe (L) zeigt die Wölbung eine etwas stärkere Tendenz zur leptokurtischen Kategorie, also einer geringen Streuung und eher spitzen Verteilungskurve, an. Der höhere Grad an Sortierung könnte dieselben Gründe wie die Ablagerungsgruppe der mächtigen Schichten (H) haben. Im Falle einer sekundär abgelagerten Schicht durch Auswaschung aus höher gelegenen Lagen, könnte die Begründung für das eher sortierte Gemisch der Prozess selbst sein. Je nach Transportkapazität und Energie, können grössere oder kleinere Körner transportiert werden. (Haas et al., 2024) Im Falle der Ablagerungsschicht (L) könnten also viele kleine Körner derselben Grösse transportiert und als ergänzende Schicht abgelagert worden sein.

Die Schiefe der mächtigen Ablagerungsschichten (H) wird entweder als symmetrisch oder feinkörnig, also leicht nach links verzerrt, klassifiziert. Dies schneidet sich nicht mit der Feststellung, dass die Korngrössen in den mächtigeren Schichten tendenziell grösser sind. Wie bereits erwähnt, ist es möglich, dass sich diese Werte nicht unterstützen, da die Schiefe lediglich die Häufigkeit der vorkommenden Korngrössen beschreibt. Es ist entsprechend anzunehmen, dass in den analysierten Bildern einzelne grosse Steine detektiert wurden, welche den Durchschnitt der Korngrössenverteilung beeinflussen, die meisten Körner jedoch mittlere bis feine Korngrössen aufweisen. Die dünneren Ablagerungsschichten (L) weisen sehr diverse Klassifizierungen auf. Die leichte Tendenz zur rechtssteilen Kurve zeigt das Gegenteil der mächtigen Schichten; die Korngrössen sind durchschnittlich eher fein, weisen aber häufiger grobe Körner auf. Vermutlich sind diese nicht erheblich grösser, da andernfalls der Durchschnitt entsprechend angepasst wäre. Zu beachten sind bei dieser Beurteilung ausserdem die fehlenden kleinsten Körner, welche nicht in die Berechnung miteinbezogen wurden. Sie würden die Schiefe so beeinflussen dass die Kurve weiter nach links, in den feinkörnigen Bereich gezogen würde, da die Häufigkeit der feinen Körnern grösser wäre. Für alle Werte gelten dieselben Limitationen dessen, weshalb sie untereinander vergleichbar bleiben.

Die Wahl der Probestandorte ist für die Berechnung der Kennwerte wie Schiefe oder Wölbung sehr entscheidend, weil einzelne grosse Blöcke auf einer relativ kleinen Fläche ( $1\text{m}^2$ ) grosse Unterschiede in der Klassifikation erzeugen können. Da der Anteil an Steinen in der untersuchten Fläche nicht höher als 82% ist, wurde höchstens eine Fläche von  $0.8\text{m}^2$  – teilweise kleiner als  $0.5\text{m}^2$  – untersucht. Die Kennwerte und deren Klassifikation gewährleisten somit keine vollständige Repräsentativität. Um sie für die gesamte Ablagerung anwendbar zu machen, müssten weitere Stichproben erfasst werden, oder der detektierte Flächenanteil des jeweiligen Standorts erhöht werden.

### 5.1.3 Topografische Variablen

Die Herstellung des Zusammenhangs vom Median oder dem Quantil 84 der Korngrösse und den Höhenstufen der Standortwahl, gibt Informationen über die Ablagerungsmorphologie bekannt. Einerseits zeigen die Trendlinien der unterschiedlichen Standorte erneut die durchschnittlich grössere Korngrösse der Mächtigen (H) und die Feinere der niedrigen Ablagerungsschichten (L) an. Andererseits kann am Verlauf beider Trendlinien erkannt werden, dass sie umso näher beieinander liegen und feinkörniger sind, je höher die Standorte gelegen sind. Der Abstand zur Materialquelle ist an diesen Standorten am geringsten, was die Erklärung für diese Dynamik sein könnte; Murgänge stürzen mit einer hohen Geschwindigkeit ins Tal, wodurch der Transport von groben Blöcken und Steinen ermöglicht wird. Größere Körner können durch die hohe kinetische Energie und die Gravitationskraft erst in flacheren Gebieten abgelagert werden, wobei feine Steine bereits in steilen Hanglagen zum Liegen kommen können (Li et al., 2023).

Dass die Ablagerung am Fuss flacher ist, wird durch die Abbildung 11, der Neigung – zusammenhängend mit den Höhenstufen der jeweiligen Standorte – ersichtlich. Die einzelnen Datenpunkte streuen in der Grafik um die Trendlinie was zeigt, dass die Ablagerung keine konstanten Neigungswerte entlang der Höhenlage hat. Die Ablagerungsfläche weist sowohl in den tiefer gelegenen Höhenstufen, als auch in den höheren Lagen unterschiedliche Neigungswinkel auf. Die Werte befinden sich zwischen  $5^\circ$  und  $35^\circ$ , was verglichen mit der von Haas et al. (2024) beschriebenen Hangneigung von  $5-15^\circ$  sehr hoch ist. Eine mögliche Erklärung für diesen grossen Unterschied ist der, dass für die Analyse die gesamte Ablagerungsfläche miteinbezogen wurde. Der obere Teil der analysierten Fläche (Höhenstufe 200-280m) könnte auch als Murgangrinne bezeichnet werden, sodass die eigentliche Ablagerung erst ab den Datenpunkten mit der Höhenlage 160m beginnen würde. Mit dieser Definition wären einige Werte im Vergleich zum definierten Neigungswinkelbereich noch immer relativ hoch, dennoch würden sie als vergleichbare Werte infrage kommen. Für die Analyse wurde die gesamte Fläche untersucht und miteinbezogen, da die Daten vorlagen und für die Erforschung der Entwicklung dennoch relevant sind.

Die Beziehung von der Neigung zum Quantil 84 der Korngrösse unterstützt das Ergebnis und die Interpretation der Abbildungen 9 & 10, welche den Zusammenhang der Korngrössen auf den unterschiedlichen Höhenstufen beschreibt. Grössere Steine werden vermehrt in flachen Hängen abgelagert, wobei kleinere, aufgrund ihrer geringeren kinetischen Energie während des Ablagerungsprozesses, in steileren Hängen erhalten bleiben (Li et al., 2023).

Der Zusammenhang des Quantils 84 der Korngrösse und der gemessenen Distanz des Ablagerungsrandes zum beprobten Standort, ergab keine markanten Ergebnisse. Die leichte Steigung der Trendlinie ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die drei Werte mit den distanziertesten Standorten zum Ablagerungsrand der Datenreihe mit den mächtigen

Ablagerungsschichten (H) angehören. Wie schon erläutert, weisen sie im Durchschnitt eine grössere Korngrösse auf als diejenigen mit den niederen Mächtigkeiten (L) und liefern so die Erklärung für die leichte Steigung. Durch das Streudiagramm (Abbildung 13) wird ersichtlich, dass vermehrt Standorte am Rand der Ablagerung gewählt wurden. Da im „Readme“ zur Feldforschung keine Angaben dazu geschrieben stehen wird davon ausgegangen, dass die jeweiligen Distanzen nicht absichtlich gewählt wurden, sondern nach dem Zufallsprinzip. Durch die visuelle Betrachtung und Einschätzung der Verteilung der Standorte auf der Murgangablagerung konnte festgestellt werden, dass die Ablagerung nicht als klassisch halbkegelförmiger Schutthang vorliegt, sondern im flacheren Bereich in mehrere Arme aufgeteilt ist. In den tiefergelegenen Gebieten war es also gar nicht möglich, einen Standort weit vom Rand entfernt zu beproben, auch wenn sie mittig in der Ablagerungsfläche lag. Die Aufteilung der Ablagerung in mehrere Arme wird mit dem Verweis auf VanDines (1996) Erkenntnis erklärt, dass sich die Ablagerung den Formen des Untergrundes anpassen.

In vielen, der gerade eben beschriebenen Grafiken, ist ein Datenpunkt der mächtigen Ablagerungsschichten (H) auffällig. Der Datenpunkt H40 weist eine sehr hohe Korngrösse auf und kann als Ausreisser interpretiert werden. Die Betrachtung des Ausgangsbildes dieses Standorts gibt bereits Hinweise zu dieser Auffälligkeit;



Abbildung 19: Fotoplot Standort H40 (Rossi, 2024).

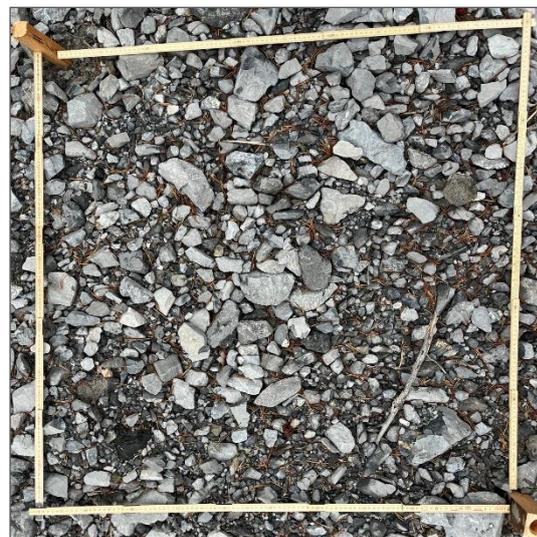


Abbildung 18: Fotoplot Standort H60 (Rossi, 2024).

Die Abbildungen 18 (Standort H40) und 17 (Standort H60) weisen einen deutlich visuell erfassbaren Unterschied auf. Das Bild des Standorts H60 kann als Standard angesehen werden, da viele der Aufnahmen der mächtigen Ablagerungsschichten diesem ähneln. Der Standort H40 könnte ein Ausreisser sein, da ausschliesslich an dieser Stelle Korngrössen dieser Art auftreten. Wahrscheinlicher ist aber, dass der Standort per Zufall ausgewählt wurde und somit auffällt. Es gibt keine Angaben dazu in den entsprechenden „Readme“-Dokumenten.

#### 5.1.4 Klimatische Bedingungen

Für die Untersuchung der klimatischen Bedingungen an den jeweiligen Standorten wurden die Temperatur- und Feuchtigkeitswerte der Loggerdaten zu den Medianwerten der Korngrößen verglichen. Die Streuung der einzelnen Datenpunkte beider Grafiken lässt vermuten, dass die eingezeichnete Trendlinie von Ausreißern geprägt wird. Zwei Datenpunkte mit mächtigen Ablagerungsschichten (H) weisen im Vergleich höhere Korngrößen und eher niedrige Temperaturmittelwerte, beziehungsweise hohe Feuchtigkeitsmittelwerte, auf. Auch werden je ein Datenpunkt der Standortgruppe (L) und (C) als sehr hohen Temperaturmittelwert, beziehungsweise tiefen Feuchtigkeitsmittelwert angezeigt. Die Repräsentativität der beiden Grafiken ist unter diesen Umständen infrage gestellt. Die statistisch signifikante Korrelation beider Loggerdatenreihen ermöglicht keinen Bezug zu der Korngrösse, weshalb kein Zusammenhang der Variablen hergestellt werden kann.

Für die Untersuchung des Einflusses der klimatischen Bedingungen auf die Murgangablagerung, sollte eine längere Messperiode als ein Jahr verwendet werden. Die Messperiode enthält einmalige Datensätze jeder Jahreszeit, welche deshalb nicht zwingend repräsentativ sind.

#### 5.2 Kritische Beurteilung der Methoden

Die Anwendung der Photogranulometrie mit BASEGRAIN ist eine gute Methode für die Bearbeitung der vorgelegenen Daten und die Generierung der Korngrößenwerte. Sie eignet sich, da die zu bearbeitenden Daten als Fotos vorlagen und im Rahmen dieser Arbeit keine vertiefende Feldarbeit durch die Autorin möglich war. Ausserdem wäre die Durchführung einer Laborsiebung nicht möglich, da die Ablagerung dem Gebiet des SNP angehört. Dies wäre ein unnatürlicher Eingriff in die Natur, welcher den Schutzstatus verletzen würde. Nach Rüther et al. (2013) ist die für die Korngrößenanalyse standardisierte Laborsiebung ein ressourcen- und zeitaufwändiger Prozess, was durch die Anwendung der Photogranulometrie vereinfacht wird. Die Ergebnisse sind qualitativ vergleichbar mit der manuellen Siebmethode (Rüther et al., 2013). In der Studie von Neumann-Mahlkau (1967) wurde die fotografische Granulometrie im Direktvergleich zur klassischen Methode untersucht, wobei sie als einfacher und genauer eingestuft worden war. Daraufhin wurde vorgeschlagen, es zum Standardverfahren für Korngrößenuntersuchungen auszubauen (Neumann-Mahlkau, 1997).

Die Verwendung der photogranulometrischen Korngrößenanalyse bringt neben vielen positiven Aspekten auch Limitationen mit sich. Da diese Methode stark von dem untersuchten Bild abhängig ist, können in der Analyse Fehler entstehen, wenn die zu analysierende Fläche mit Vegetation bedeckt ist oder die Erde unterhalb zum Vorschein kommt. Bezogen auf das Programm BASEGRAIN besteht ausserdem eine Limitation in der Detektion von Körnern mit kleinem Durchmesser. Für alle Bilder wurde der Parameter dieser Einstellung so gewählt, dass Körner bis zu 25 Pixeln als solche detektiert wurden. Dies beeinflusst in der statistischen

Analyse das untere Quantil stark, sodass kleinere Werte nicht in die Analyse einfließen konnten. Würde der Parameter auf eine niedrigere Zahl gesetzt werden, führte dies zu einer starken Übersegmentierung der Körner, was die Nachbearbeitung des detektierten Bildes erschweren und um ein Vielfaches zeitaufwändiger machen würde. Zur Beurteilung kann in den Resultaten deshalb nur auf den Median und das obere Quantil eingegangen werden. Ausserdem werden die Zwischenräume der Körner meist grösser eingezeichnet, als sie tatsächlich sind. Es gibt in den manuellen Bearbeitungswerkzeugen keine Möglichkeit, die zu klein detektierten Körner grösser einzuzeichnen, was die entsprechenden Daten in den tatsächlichen Dimensionen verfälscht. Sie bleiben untereinander dennoch vergleichbar.

Auch das Programm QGIS eignet sich gut für die Anwendung, wie sie im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde. Die kostenlose Zugänglichkeit, eine benutzerfreundliche Oberfläche und die vielseitigen Werkzeuge, machen das Programm attraktiv (GrindGIS, 2019) für die Umsetzung von Projekten dieser Art. Von Vorteil ist, dass Raster- und Vektorlayer zeitgleich auf derselben Arbeitsplattform angezeigt werden können und flexible Funktionen auf den gewünschten Layer anwendbar sind. Mittels Attributtabelle wird eine gute Übersicht über die eingelesenen und bearbeiteten Daten generiert, welche die schnelle Weiterverarbeitung gewährleistet. Das Benutzen von QGIS hatte in diesem Rahmen den Zweck, Messungen von unterschiedlichen Distanzen sowie Berechnungen zur Hangneigung durchzuführen und diente der bildlichen Übersicht des Gebiets.

Die Anwendung von Microsoft Excel erwies sich als geeignete Plattform, die generierten Daten einerseits zu sammeln, andererseits zu verarbeiten. Vielseitige Funktionen unterstützten die Verfolgung des Ziels, die Forschungsfragen zu beantworten, indem entsprechende Grafiken und Tabellenübersichten erstellt werden konnten.

#### 5.2.1 Vorschläge zur verbesserten Verarbeitung

Zur aussagekräftigeren Analyse der Korngrößenverteilung per BASEGRAIN sollten die Fotos an Standorten gemacht werden welche eine möglichst geschlossene Kornbedeckung aufweisen und nicht von Vegetation bedeckt sind. Insbesondere für den Vergleich der Korngrößen der Murgangablagerung mit den Kontrollflächen, wäre die Nichtbedeckung von Vegetation wichtig. Um repräsentativere Proben zu erhalten, wäre es von Vorteil gewesen, wenn die zu analysierenden Fotos in demselben Zeitraum wie dem des Murgangereignisses geschossen worden wären. Die Ablagerung wird während eines Jahres durch Erosionsprozesse fortlaufend beeinflusst und verändert, weshalb eine zeitnahe Datenaufnahme von Vorteil wäre. Für die Analyse von sehr kleinen Korngrößen sollte entweder eine Kamera mit höherer Auflösung verwendet, oder nicht die Methode der Photogrammetrie ausgewählt werden. Es gibt andere Methoden wie die von Beuselinck et al. (1998) vorgestellte Laserdiffraktometrie, welche für die Untersuchung von kleinen Körnern geeigneter sind. Falls zusätzliche Informationen über die

gesamte Zusammensetzung der Ablagerung erwünscht sind, eignet sich BASEGRAIN ebenfalls nicht für die Analyse der Korngrößenverteilung. Mit dieser Methode kann lediglich die oberste Schicht einer Ablagerung genauer untersucht werden und erlaubt nur Abschätzungen der darunterliegenden Schichten.

### **5.3 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext**

Die Charakterisierung der untersuchten Murgangablagerung fügt sich in den Kontext der aktuellen Forschung ein. Die Länge der Ablagerung erstreckt sich über einen Kilometer und es finden neue Gerinnebildungen statt. Auch dass sich die Ablagerung der Form des Untergrundes anpasst, stimmt mit der Charakterisierung von Murgangablagerungen nach VanDine (1996) überein. Die Ablagerung wird durch geomorphologische Prozesse wie fluviale Erosion oder Windabtragung geprägt, was den Aussagen von Haas et al. (2024) entspricht. Dass Murgangablagerungen nach VanDine (1996) grundsätzlich sehr unsortierte Sedimente aufweisen, konnte mit den Ergebnissen dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Die Begründung für diese Unstimmigkeit liegt dabei bei der angewendeten Methode.

Die Studie von Foster et al. (2020) untersuchte die Entwicklung zweier Murgangablagerungen im westlichen Südwashington über einen langen Zeitraum. Sie setzten dabei den Fokus auf die Erfassung der vorhandenen Fischpopulation und die Vegetationsentwicklung. Die Variablen der vorliegenden Arbeit wurden auf einen anderen Fokus gelegt, was einen Vergleich zur Studie, zusätzlich zu den unterschiedlichen Eigenschaften der Landschaft aufgrund der geografischen Distanz, unzureichend macht.

Die vorliegende Arbeit bietet neue Einblicke in die Sukzession von Murgangablagerungen. Es werden unterschiedliche, geomorphologische Variablen in einen Zusammenhang gebracht und untersucht. Im Unterschied zu bestehenden Studien wurden spezifische Aspekte der Korngrößenverteilung und deren Einfluss auf die Lebensraumdynamik behandelt, welche bisher in der Forschung wenig berücksichtigt wurden. Um die Sukzession der Murgangablagerung in Buffalora ganzheitlich zu untersuchen, sollten in geeigneten zeitlichen Abständen weiterhin Daten derselben Variablen gesammelt werden, um einen detaillierteren Überblick und eine repräsentative Datensammlung zu erhalten. Diese Untersuchung dient zur Datenverarbeitung, der ersten Bestandsaufnahme und bietet eine gute Grundlage für darauf aufbauende Forschung.

### **5.4 Beantwortung der Forschungsfragen**

Die Korngrößenverteilung beeinflusst die strukturellen Eigenschaften der Murgangablagerung, indem die Gesteinsdecke unterschiedlich dicht geschlossen ist oder die Sortierung innerhalb der Ablagerung variiert. Mächtige Ablagerungsschichten weisen in den analysierten

Bildern einen höheren Anteil an Bedeckung durch Steine auf und haben insgesamt grössere Korngrößen. Die untersuchte, oberste Gesteinsschicht weist eine relativ gute Sortierung auf, was durch erosive Transportprozesse erklärbar ist. Niedere Ablagerungsschichten weisen im Vergleich kleinere Korngrößen auf und sind tendenziell noch besser sortiert. Dies spricht für die Möglichkeit, dass es sich nicht nur um primär abgelagertes Murgangmaterial handelt, sondern dass die ausgewaschenen, kleineren Körner von den mächtigen Schichten ausgewaschen wurden und in Lagen mit weniger Ablagerungsmaterial sekundär zum Liegen kamen. Niedere Ablagerungsschichten sind öfter von Vegetation verdeckt oder so dünn, dass sie den Boden nicht vollständig abdecken. Ersteres kann durch verbesserte Bedingungen für das Vegetationswachstum erklärt werden, wobei zweiteres die Repräsentativität der untersuchten Standorte infrage stellt.

Die zweite Forschungsfrage geht dem Einfluss der topografischen und klimatischen Bedingungen auf den Lebensraum nach. Die Faktoren wurden mit der Korngrößenverteilung in Verbindung gebracht, wobei festgestellt werden konnte, dass gröbere Körner in flacherer Topografie vorkommen und entsprechend kleinere Korngrößen in steileren Hängen aufzufinden sind. Die Erklärung für dieses Phänomen bezieht sich auf die Ablagerungsdynamik eines Murgangs. Die Untersuchung des mikroklimatischen Einflusses ermöglicht keine allgemeingültige Aussage. Diagramme zeigen auf, dass Standorte mit gröberen Körnern durch niedrige Durchschnittstemperaturen und erhöhte Feuchtigkeit charakterisiert sind, wobei die Trends durch Ausreisser bestimmt werden. Um die Aussagekraft dieser Variable zu steigern, müssten längere Messperioden aufgenommen und weitere Einflüsse fortlaufend beobachtet werden.

Die dritte Frage richtet sich nach räumlich auftretenden Mustern auf der Ablagerung. Die Frage wurde insofern bereits beantwortet, als dass Muster von unterschiedlicher Korngröße entlang der Mächtigkeit auftreten. Mächtige Ablagerungsschichten weisen grössere – niedere Schichten kleinere – Korngrößen auf. Die zunehmende Höhenlage der beprobten Standorte hängt mit kleiner werdenden Körnern zusammen, was sich auch in dem Vergleich mit den Neigungswinkeln widerspiegelt. In der Nähe der Materialquelle sind die Unterschiede in den Korngrößen kleiner, da insgesamt kleinere Korngrößen vorliegen. Die Distanz der beprobten Standorte zum Ablagerungsrand zeigte keine Korrelation zur Korngröße oder deren statistischen Kennwerten. Die Form der Ablagerung entspricht nicht derjenigen eines typischen Halbkegels sondern wird durch mehrere Ablagerungsarme charakterisiert. Dies hat den Einfluss, dass die jeweiligen Distanzen nicht als Vergleichswerte angesehen werden können.

Die Sukzession der Murgangablagerung kann anhand von physikalischen Grundlagen, topografischem Einfluss und räumlicher Variabilität beschrieben werden. Die Korngrößenverteilung bestimmt – kombiniert mit der Mächtigkeit der Ablagerungsschichten – strukturelle Eigenschaften der Fläche und beeinflusst so die Verfügbarkeit von Ressourcen, die für das

Pflanzenwachstum entscheidend sind. Steile Hänge und flache Bereiche führen zu unterschiedlichen Sedimentverteilungen, die wiederum die Stabilität und Ressourcenverfügbarkeit des Lebensraums beeinflussen. Durch Unterschiede in der Korngrößenverteilung und der Ablagerungsmächtigkeit, wird eine heterogene Landschaft beschrieben, welche unterschiedliche Sukzessionsmuster ermöglicht.

## **6 Schlussfolgerung & Ausblick**

Die vorliegende Arbeit untersuchte die Sukzession einer Murgangablagerung im Schweizerischen Nationalpark anhand von Variablen, welche die Substrateigenschaften und Lebensraumdynamik charakterisieren. Die durchgeführten Analysen zeigen, dass geomorphologische Prozesse und die strukturellen Begebenheiten die Entwicklung der behandelten Murgangablagerung beeinflussen.

Die Forschungsfragen konnten weitgehend beantwortet werden; Die Ergebnisse verdeutlichen, dass mächtige Ablagerungsschichten durch grössere Korngrößen und eine geschlossene Gesteinsdecke geprägt sind, während niedrige Ablagerungsschichten feinere Körner und eine heterogenere Zusammensetzung aufweisen. Die Korngrösse beeinflusst die Struktur der Murgangablagerung und die damit verbundene Ressourcenverfügbarkeit für die Regenerierung des Lebensraums. Erosive Prozesse beeinflussen die Oberfläche der Ablagerung so, dass sie insgesamt eine gute Sortierung aufweist. Die Untersuchung der topografischen Variable zeigt auf, dass grössere Körner aufgrund der Ablagerungsdynamik tendenziell in flacheren Bereichen abgelagert werden und feinere auch in steilen Hängen eine stabile Zusammensetzung ergeben. Es konnten räumliche Muster in der Ablagerungsmächtigkeit und der Verteilung der Korngrößen identifiziert werden, welche Hinweise zur Stabilität und Heterogenität des Gebiets liefern. Der mikroklimatische Einfluss wurde anhand der Temperatur- und Feuchtigkeitsvariable untersucht, wobei nur ein begrenzt aussagekräftiger Zusammenhang hergestellt werden konnte. Erste Trends deuten darauf hin, dass grobkörnige Bereiche mit geringeren Durchschnittstemperaturen und höherer Feuchtigkeit korrelieren könnten.

Die photogranulometrische Analyse mit BASEGRAIN wurde als geeignete Methode zur Analyse der Korngrößen in einem Naturschutzgebiet anerkannt. Auch die Verwendung von QGIS als Darstellungs- und Berechnungswerkzeug erwies sich als unterstützend. Allerdings bleiben Einschränkungen im Bezug auf die Repräsentativität der Daten bestehen, da tiefere Schichten und sehr feinkörniges Material nicht in die Analyse miteinbezogen werden konnten.

Die Arbeit bietet einen Beitrag an die wissenschaftliche Untersuchung der Erholung von Lebensräumen nach natürlichen Störungsereignissen. Sie bietet eine Grundlage für die weiterführende Forschung im Bezug zur ökologischen Bedeutung von Murgangablagerungen –

insbesondere des alpinen Raums. In Anbetracht des globalen klimatischen Wandels und der damit erwarteten Häufigkeit von Naturereignissen dieser Art, ist ein vertieftes Verständnis der geomorphologischen und ökologischen Prozesse von regem Interesse.

Die Untersuchung stellt den Standpunkt einer Murgangablagerung nach einem Jahr des Ereignisses dar. Um die langfristige Sukzession zu beobachten und zu analysieren, sollte die Datenaufnahme und deren Auswertung in nützlichen Zeitabständen weiterhin durchgeführt werden. Zum diskutierten Standpunkt liegen ausserdem Daten zum Vegetationsbestand vor, welche im Rahmen dieser Arbeit nicht bearbeitet wurden. Für die Untersuchung der biologischen Entwicklung und der Weiterführung der Sukzessionsanalyse, stellt dies eine Möglichkeit dar.

Die Inhalte dieser Arbeit leisten einen bedeutenden Beitrag zur Erforschung der Störungsökologie und dient dem besseren Verständnis der Resistenz und Anpassungsfähigkeit alpiner Lebensräume.

## **Datenverfügbarkeit**

Das Datenpaket des Schweizerischen Nationalparks, ist nicht öffentlich verfügbar, sondern wurde für diese Arbeit zur Verfügung gestellt. Virginia Ruiz-Villanueva traf mit Christian Rossi die Vereinbarung, es im Rahmen dieser Arbeit zu teilen und zu verarbeiten. Das Paket wurde der Autorin am 22.10.2024 als zip-Datei zur Verfügung gestellt.

Das Luftbild, welches für die Erstellung der QGIS-Übersicht verwendet wurde, ist frei zugänglich und kann als WMS-Layer hinzugefügt werden, wenn zuvor die Verbindung zur Datenquelle mit der URL: <https://wms.geo.admin.ch/> hergestellt wurde. Es heisst „SWISSIMAGE Hintergrund“ und hat im Verzeichnis die Nummer 318.

## Literaturverzeichnis

- Architectura. (2025). Stiftung für Orts und Landschaftsbildpflege. Abgerufen am: 21.01.2025.  
Abgerufen von: <https://www.architectura.ch/Karten/CH-GR.gif>
- Batel, W. (1971). Einführung in die Korngrößenmesstechnik. 3. Auflage. Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-49189-4.
- Beuselinck, L., Govers, G., Poesen, J., Degraer, G. & Froyen, L. (1998). Grain-size analysis by laser diffractometry: comparison with the sieve-pipette method. *CATENA*. 32(3-4). 193-208. DOI: 10.1016/S0341-8162(98)00051-4
- Coussot, P. & Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*. 40(3-4). 209-227. DOI: 10.1016/0012-8252(95)00065-8.
- Detert, M. & Weitbrecht, V. (2013). User guide to gravelometric image analysis by BASEGRAIN. *Advances in River Sediment Research*. Fukoka, S., Nakagawa, H., Sumi, T. & Zhang, H. 1789-1796. London: CRC Press.
- Eichel, J., Stoffel, M. & Wipf, S. (2023). Go or grow) - Feedbacks between moving slopes and shifting plants in high mountain environments. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. 47(6). 967-985. DOI: 10.1177/03091333231193844.
- Fehr, R. (1987). Einfache Bestimmung der Korngrößenverteilung von Geschiebematerial mit Hilfe der Linienzahlanalyse. *Schweizer Ingenieur und Architekt*. 105(38). 1104-1109. DOI: 10.5169/SEALS-76710.
- Folk, R. L. & Ward, W. C. (1957). Brazos River Bar: A study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sediments Petrology*. 27(1). 3-26.
- Foster, A. D., Claeson, S. M., Bisson, P. A. & Heimbürg, J. (2020). Aquatic and riparian ecosystem recovery from debris flows in two western Washington streams, USA. *Ecology and Evolution*. 10(6). 2749-2777. DOI: 10.1002/ece3.5919.
- Gough, C. M., Buma, B., Jentsch, A., Mathes, K. C. & Fahey, R. T. (2024). Disturbance theory for ecosystem ecologists: A primer. *Ecology and Evolution*. 14(6). e11403. DOI: 10.1002/ece3.11403.
- GrindGIS. (2019). Pros and Cons of QGIS. Abgerufen am: 23.01.2025. Abgerufen von: <https://grindgis.com/software/pros-and-cons-of-qgis>
- Haas, T. D., Lau, C. & Ventra, D. (2024). Debris-Flow Watersheds and Fans: Morphology, Sedimentology and Dynamics. *Advances in Debris-flow Science and Practice*. Jakob, M., McDougall, S. & Santi, P. 9-73. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-48691-3.

- Haas, T. D., & Woerkom, T. V., (2016). Bed scour by debris flows: experimental investigation of effects of debris-flow composition. *Earth Surface Processes and Landforms*. 41(13). 1951-1966. DOI: 10.1002/esp.3963.
- Hübl, J. & Kienholz, H. (2006). DOMODIS – Dokumentation alpiner Naturereignisse. Klagenfurt: Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent.
- Kaitna, R., Palucis, M. C., Marra, F. & Huggel, C. (2024). Causes and Triggers. *Advances in Debris-flow Science and Practice*. Jakob, M., McDougall, S. & Santi, P. 191-217. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-48691-3.
- Lanzoni, S., Gregoretti, C. & Stancanelli, L. M. (2017). Coarse-grained debris flow dynamics on erodible beds. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. 122(3). 592-614. DOI: 10.1002/2016JF004046.
- Li, C. J., Hu, Y. X., Fan, G., Zhu, Q. Y. Liu, D. R. & Zhou, J. W. (2024). Exploring debris flow deposit morphology in river valleys: Insights from physical modeling experiments. *Engineering Geology*. 332. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107465.
- Luzuriaga, A. L., Escudero, A., Olando, J. M. & Loidi, J. (2005). Regenerative role of seed banks following an intense soil disturbance. *Acta Oecologica*. 27(1). 57-66. DOI: 10.1016/j.actao.2004.09.003.
- Neumann-Mahlkau, P. (1967). Korngrößenanalyse grobklastischer Sedimente mit Hilfe von Aufschluss-Photographien. *Sedimentology*. 9(3). 245-261. DOI: 10.1111/j.1365-3091.1967.tb02040.x.
- Rixen, C. & Brugger, S. (2004). Naturgefahren - ein Motor der Biodiversität. *Forum für Wissen*. 67-71.
- Rossi, C. (2024). Datenpaket zur Murgangablagerung in Buffalora im Schweizerischen Nationalpark, Zernez. Bereitgestellt vom SNP am: 22.10.2024. [Unveröffentlichte Daten].
- Rüther, N., Huber, S., Spiller, S. & Aeberle, J. (2013). Verifying a photogrammetric method to quantify grain size distribution of developed armor layers. Beijing: Tsinghua University Press.
- Schreiber, U. & Herpin, R. (1992). Korngrößenanalysen an kalt- und warmfluvialen Sedimenten des Lechtals - Bayerisch - Schwaben. *E&G Quarternary Science Journal*. 42(1). 40-51. DOI: 10.3285/eg.42.1.03.
- SNP. (2025). Schweizerischer Nationalpark. Grundlagen & Impressionen. Abgerufen am: 19.01.2025. Abgerufen von: <https://nationalpark.ch/about/nationalpark/>
- Stoffel, M., Allen, S. K., Ballesteros-Cánovas, J. A., Jakob, M. & Oakley, N. (2024). Climate Change Effects on Debris Flows. *Advances in Debris-flow Science and Practice*. Jakob,

- M., McDougall, S. & Santi, P. 273-308c. Cham: Springer. DOI: 10.1007/978-3-031-48691-3.
- Stolz, A. & Huggel, C. (2008). Debris flows in the Swiss National Park: the influence of different flow models and varying DEM grid size on modeling results. *Landslides*. 5(3). 311-319. DOI: 10.1007/s10346-008-0125-4.
- Swisstopo (2025). Karte erstellt mit Swisstopo am: 21.01.2025. Abgerufen am: 21.01.2025. Abgerufen von: <https://map.geo.admin.ch/>
- Topp, W. (1998). Einfluss von Rekultivierungsmassnahmen auf die Bodenfauna. *Braunkohle-tagebau und Rekultivierung*. Pflug, W. 325-336. Berlin: Springer. DOI: 10.1007/978-3-642-58846-4\_28.
- VanDine, D. F. (1996). Debris Flow Control Structures for Forest Engineering. *Ministry of Forests Research Programm*. 22. 1-65.
- Weber, D. (2004). Untersuchungen zum Fliess- und Erosionsverhalten granularer Murgänge. Brimensdorf: Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft.
- White, P. S. (1979). Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *The Botanical Review*. 45(3). 229-299. DOI: 10.1007/BF02860857.
- Wipf, S., Rossi, C., Von Büren, R. & Gubler, S. (2024). Murgang Buffalora. Von tabula rasa zu neuem Leben. Schweizerischer Nationalpark und SCNAT. Abgerufen am: 19.01.2025. Abgerufen von: <https://nationalpark.ch/forschung/murgang-buffalora/>
- Wohlgemuth, T., Jentsch, A. & Seidl, R. (2019). Störungsökologie. Bern: Haupt.
- Wolman, G. M. (1954). A method of sampling coarse river-bed material. *Eos - Transactions American Geophysical Union*. 35(6). 951-956. DOI: 10.1029/TR035i006p00951

## Anhang

### Datensammlung Nr. 1: veränderte Parameter für die Bildanalyse in BASEGRAIN.

Standort	medfiltisz10	facgraythr1	medfiltisz20	areaCutLfA	areaCutWW	smallestArea
H20	4	0.6	3	25	10	25
H40	6	0.7	2	25	20	25
H60	4	0.6	3	25	10	25
H80	5	0.5	2	25	10	25
H100	5	0.7	3	25	10	25
H120	6	0.7	3	25	10	25
H160	6	0.8	3	25	30	25
H200	6	0.6	3	25	20	25
H240	4	0.6	3	25	30	25
H280	6	0.8	3	25	20	25
L20	6	0.7	3	25	30	25
L40	6	0.6	3	25	30	25
L60	5	0.8	3	25	30	25
L80	7	0.8	3	40	20	25
L100	5	0.8	3	25	20	25
L120	5	0.7	2	25	10	25
L160	5	0.8	3	25	30	25
L200	4	0.8	3	25	10	25
L240	5	0.7	3	25	20	25
L280	5	0.8	3	25	20	25
C200	5	0.8	3	25	20	25
C240	-4	0.8	3	25	10	25
C280	3	0.8	2	25	30	25

### Datensammlung Nr. 2: Daten auf welchen die Abbildungen 7-15, sowie die Grafiken der Datensammlung Nr. 3 beruhen. (T: Temperatur/ F: Feuchtigkeit)

Standorte	Minimum	Q16	Median	Q84	Maximum	Anteil Steine [%]
H20	10.0004283	11.1061754	15.144704	24.8000206	99.7530127	69.05
H40	10.0281908	14.4820621	28.8112359	51.8188333	121.710716	73.06
H60	10.0183785	11.1450692	15.2780611	26.7297321	77.6631385	70.55
H80	10.0034792	12.6983294	20.4601653	32.4034113	66.9432178	76.3
H100	10.0279347	11.2049488	15.3648553	26.7479594	93.2371958	69.62
H120	10.000995	11.2863343	15.5548687	25.12993	97.9433702	67.74
H160	10.0040081	11.7293769	16.819299	27.48186	77.9752653	77
H200	10.0101018	11.7339198	17.5362089	30.8871765	92.2649071	82.14
H240	10.0002669	10.9173777	13.6473113	19.5180947	65.9582556	61.12
H280	10.002633	11.2254907	15.342226	24.3966413	100.725379	66.21
L20	10.0058035	12.1506289	19.0094939	32.4723026	84.017628	69.55
L40	10.0166291	11.21723	14.4766429	22.3250239	79.0885406	69.64
L60	10.0021956	10.6487749	12.7953247	18.1861687	78.699847	51.96

L80	10.0173745	11.255443	15.3294515	25.100195	99.1811264	59.23
L100	10.0057034	10.829929	13.3811197	20.4018339	78.7704046	60.23
L120	10.0049207	10.5945124	12.1829258	16.5243135	53.8802422	38.81
L160	10.0196782	10.8682328	13.170811	19.6765213	87.4145261	41.87
L200	10.0010293	10.7093225	12.7453404	17.6812625	74.2963842	56.11
L240	10.003683	10.8826601	13.8202584	21.1019996	92.3193384	68.14
L280	10.0025769	10.9761486	14.4432402	23.6852041	62.3840007	70.2
C20						0
C40						0
C60						0
C80						0
C100						0
C120						0
C160						0
C200	10.0002838	10.8432868	13.6939488	20.1046879	51.3532428	49.67
C240	10.0181342	10.9022882	12.9666173	19.4957825	63.7304436	62.17
C280	10.0007074	10.4785003	11.8895393	16.4530332	110.364928	37.85

Standorte	Neigung [°]	T. MIN	T. MAX	T. MW	F. MIN	F. MAX	F. MW
H20	13.165	-8.5	33	7.79767103	21.5	95.5	75.5935226
H40	5.635	-7.5	42.5	6.23445623	21	109	88.5876482
H60	21.135	-4.5	31	7.20861926	28.5	99.5	81.8248077
H80	9.745	-7	87.5	4.28656835	26.5	100	92.3355254
H100	14.075	-10	36.5	8.11961946	15.5	98	75.0730401
H120	17.33	-8	38	6.04147994	21.5	98	86.6036998
H160	20.615						
H200	23.595	-5	42.5	7.00764192	15.5	100	84.6179039
H240	23.555	-5.5	39.5	7.87908089	17.5	104.5	79.6298087
H280	25.93						
L20	6.155						
L40	13.32	-12	38.5	5.8466937	28.5	102.5	84.6941672
L60	18.655	-8.5	87.5	7.51850697	24	100	81.4900707
L80	17.44	-4.5	33.5	4.04291535	51.5	103.5	90.7376446
L100	16.06	-12	51	23.1284051	26	100	86.4310148
L120	17.035	-4	29.5	5.25743398	7	98.5	88.264556
L160	18.76	-7	42	6.45482429	16.5	109.5	90.4755666
L200	18.56	0	39.5	13.8751448	27	104.5	77.485226
L240	21.77	-8.5	24.5	2.49886467	79	110	105.038261
L280	27.12	-5	36.5	7.92841547	16.5	106.5	81.9811291
C20	11.715	-9	87.5	7.45903514	31.5	98.5	83.6852256
C40	20.785	-7	39.5	5.24984404	0	100	90.0170514
C60	15.225	-12	33.5	7.25389894	22.5	96.5	77.6951029
C80	15.58	-4.5	38	3.90936359	34	110	101.003847
C100	20.375	20	30.5	22.5887605	33	61	43.4527311

<b>C120</b>	19.52	-11	35	5.80047827	28.5	100	85.9208255
<b>C160</b>	19.75	-5	36.5	3.78524112	30	108.5	99.5280869
<b>C200</b>	27.565	-5	22	6.66451256	91	109.5	100.378877
<b>C240</b>	21.67	-4.5	37.5	7.83426908	27.5	100	84.0579642
<b>C280</b>	35.795	-6.5	41.5	7.93163859	12	82.5	62.9178623

**Datensammlung Nr.3:** Grafiken von welchen die Variablen auf Zusammenhänge geprüft wurden aber keine identifizierbar bzw. erwähnenswert sind. Reihenfolge entspricht der Aufzählung im Kapitel 4.1.5.

