

Vegetationsanalyse auf einer Murgangablagerung im Schweizerischen Nationalpark

**Bachelorarbeit am Geographischen Institut der
Philosophisch Naturwissenschaftlichen-Fakultät
Universität Bern**

Linda Cuanillon
linda.cuanillon@gmail.com
21-126-560

Abgabe: 26 August 2025

Betreuung:
Prof. Dr. Virginia Ruiz-Villanueva
Geographisches Institut Universität Bern

Abstract

Der Blick eines Menschen auf ein Murgangereignis nimmt meist erst die Zerstörung, das Durcheinander und den Verlust wahr. Doch ein Perspektivenwechsel zeigt, dass Naturereignisse als Teil des natürlichen Ökosystems nicht per se eine Katastrophe sind. Die aktuelle Forschung zeigt, dass sich ein Ökosystem nach einem Ereignis oft gut erholen kann und die lokale Vegetation überwiegend an das Störungsregime angepasst ist. Die entstandene Lücke kann die Resilienz und Artenvielfalt sogar fördern. Im Schweizerischen Nationalpark hat es Platz für solche Ereignisse. Mit dem Ziel, die natürlichen Prozesse zu erforschen und streng zu schützen, bietet der Park im Graubünden die Gelegenheit, ein unberührtes Naturereignis zu untersuchen. So kann beispielsweise der Frage nachgegangen werden, wie sich das Ökosystem in dieser steinigen Umgebung entwickelt. Konkret wird dies als langfristiges Forschungsprojekt bei den Ablagerungen des Murgangs Buffalora gemacht. Die vorliegende Arbeit untersucht die Vegetationsentwicklung ein Jahr nach dem Ereignis anhand statistischer Tests und der Visualisierung von Trends durch Grafiken. Besonderer Fokus wird auf die Substratvariabilität der Ablagerung gelegt und so kann gezeigt werden, dass bereits ein Jahr nach dem Ereignis Muster der Wiederbesiedlung identifizierbar sind. Die ausdauernde Bergföhre kann als Pionierart den rauen Bedingungen einer Murgangablagerung trotzen und ihre Sämlinge lassen sich entlang der Ablagerung beobachten. Auch im Vergleich zu den anderen Arten zeigt die Bergföhre ein eigenes Entwicklungsmuster. Während die grösste Anzahl der Arten in Bereichen geringer Ablagerungsmächtigkeit und feiner Korngrössen beobachtet wird, sind viele Sämlinge der Bergföhre in vergleichsweise gröberen Korngrössen und mächtigeren Ablagerungen gekeimt.

Da die Untersuchungen keine Langzeitdaten beinhalten, können keine allgemeingültige Aussagen bezüglich der Vegetationsentwicklung auf der Murgangablagerung gemacht werden. Die Ergebnisse der Arbeit verdeutlichen jedoch die Relevanz des Zusammenspiels zwischen belebter und unbelebter Umwelt und können als Ausgangslage für weiterführende Forschung dienen.

Danksagung

Gerne möchte ich mich bei allen bedanken, die mir die Umsetzung dieser Bachelorarbeit ermöglicht haben. Mit Christian Rossi durfte ich im Gespräch meine ersten Fragen zum Forschungsprojekt klären und er gab mir einen Überblick über das Ereignis und das Forschungsprojekt zum Murgang Buffalora. Auch ausserhalb des inhaltlichen Rahmens der Arbeit empfing er mich in Zerneß, um mir einen Einblick in die Forschungsarbeit des Schweizerischen Nationalparks zu ermöglichen. Zudem möchte ich Virginia Ruiz-Villanueva, meiner Betreuerin, danken. Mit vielen Ideen, unterstützenden Kommentaren und ergänzenden Anregungen hat sie jederzeit meine Fragen beantwortet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Kontext und Relevanz	1
1.2	Theoretische Grundlagen	2
1.2.1	Murgänge als natürliche Störungen	2
1.2.2	Sukzession der Vegetation in den Alpen	2
1.2.3	Vegetation im Zusammenhang mit Naturereignissen	5
1.3	Stand der Forschung	6
1.3.1	Forschungslücken und Relevanz	7
1.4	Ziel der Arbeit	8
2	Untersuchungsgebiet, Daten	9
2.1	Untersuchungsgebiet	9
2.1.1	Kontext Schweizerischer Nationalpark	9
2.1.2	Das Untersuchungsgebiet	10
2.1.3	Das Ereignis	11
2.1.4	Forschung zum Murgang Buffalora	12
2.2	Daten	12
2.2.1	Drohrendaten	12
2.2.2	Plots	12
2.2.3	Temperatur und Feuchtigkeit	13
2.2.4	Vegetation	13
2.2.5	Konrgrößen und Hangneigung	13
3	Methoden	15
3.1	Literaturrecherche	15
3.2	Geodatenanalyse	15
3.3	Statistische Analyse	15
4	Ergebnisse	17
4.1	Datenanalyse	17
4.1.1	Auswertung Klimadaten	17
4.1.2	Verteilung der Artenvielfalt	19
4.1.3	Verteilungsmuster <i>Pinus mugo Turra</i>	20
4.1.4	Vegetationsanalyse in Zusammenhang mit der Ablagerung	21
4.1.5	Abstand der Vegetation zum Wald	24
4.1.6	Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Vegetation	25
4.1.7	Prüfung weiterer Variablen	26
4.2	Übersicht Ergebnisse	26

5	Diskussion.....	28
5.1	Interpretation der Ergebnisse	28
5.1.1	Auswertung der Klimadaten	28
5.1.2	Verteilung der Artenvielfalt.....	28
5.1.3	Verteilung von <i>Pinus mugo Turra</i>	29
5.1.4	Einfluss der Ablagerungsmächtigkeit.....	29
5.1.5	Einfluss der Substrat-Korngrösse	29
5.1.6	Distanz zum Wald	30
5.1.7	Einfluss der Hangneigung	30
5.1.8	Übersicht der Ergebnisse	30
5.2	Mögliche Fehler	31
5.3	Wissenschaftlicher Kontext	32
5.4	Beantwortung der Forschungsfragen	33
6	Schlussfolgerung und Ausblick	34
6.1	Zusammenfassung	34
6.1.1	Beantwortung der Fragestellung	34
6.1.2	Ausblick und Offene Fragen	35
6.1.3	Gesamteinschätzung der Thematik	35
6.1.4	Themen für nachfolgende Arbeiten	35
7	Literaturverzeichnis	36
8	Daten- und Codeverfügbarkeit.....	39
9	Anhang.....	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung Murgang.....	2
Abbildung 2 Darstellung alpine Vegetation	4
Abbildung 3 Standort Murgang- Ablagerung	9
Abbildung 4 Schema Unterarten Bergföhre	10
Abbildung 5 Geologischer Untergrunds Untersuchungsgebiets	11
Abbildung 6 Ablagerung im Bergföhrenwald	11
Abbildung 7 Beispiel eines Plots (L240)	13
Abbildung 8 Verteilungsübersicht der Untersuchungsplots	14
Abbildung 9 Nahaufnahme Standorte Plots	14
Abbildung 10 Variabilität der Ablagerungsmächtigkeit.....	14
Abbildung 11 Boxplots Temperaturwerte nach Jahreszeiten	17
Abbildung 12 Boxplots Luftfeuchtheitswerte nach Jahreszeiten	17
Abbildung 13 Darstellung Temperaturverteilung mit Höhe	18
Abbildung 14 Darstellung der Luftfeuchtheitsverteilung mit Höhe.....	18
Abbildung 15 Temperaturverlauf mit Höhe nach Ablagerungskategorien	19
Abbildung 16 Visualisierung der Anzahl Arten pro Plot	20
Abbildung 17 Verteilung <i>Pinus mugo</i>	20
Abbildung 18 Verteilung Anzahl Sämlinge von <i>Pinus mugo</i> entlang Höhenstufen.....	21
Abbildung 19 Anzahl der <i>Pinus mugo</i> Turra Sämlinge pro Höhenstufe	22
Abbildung 20 Zusammenhang zwischen Korngrößen und Anzahl Arten.....	22
Abbildung 21 Zusammenhang zwischen Korngrösse und Anzahl der Sämlinge	23
Abbildung 22 Boxplots Verteilung nach Korngrößenkategorie	24
Abbildung 23 Abstand der Plots zum Wald und Anzahl der Arten	24
Abbildung 24 Abstand der Plots zum Wald und Anzahl Sämlinge <i>P. mugo Turra</i>	25
Abbildung 25 Zusammenhang Hangneigung und Anzahl Arten	25
Abbildung 26 Zusammenhang Hangneigung und Anzahl Sämlinge <i>P. mugo Turra</i>	26
Abbildung 27 Korrelationsmatrix Spearman-Rangkorrelationstests	27

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Anzahl Arten im Vergleich zu der Anzahl <i>P. mugo Turra</i> Exemplare	21
Tabelle 2 Anzahl Arten und <i>P. mugo Turra</i> -Sämlinge, eingeteilt in Korngrößenklassen.....	23

1 Einleitung

1.1 Kontext und Relevanz

Natürliche Prozesse können für den Menschen verheerende Dimensionen annehmen. In diesem Kontext wird dann meist von Naturgefahren und Umweltkatastrophen gesprochen. Doch nicht alle Naturereignisse sind auch Katastrophen, da nicht immer die Sicherheit der Menschen bedroht wird (Ranke, 2023). In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, inwiefern Störungsereignisse auch in Bezug auf die Natur einen zerstörerischen Charakter haben, denn für ein gesundes Ökosystem braucht es nicht immer gleichbleibende Umweltbedingungen. Es zeigt sich, dass sich je nach Magnitude und Charakter der Ereignisse Störungen sehr unterschiedlich auf Ökosysteme auswirken können. Nach dem Verlust von lebender Biomasse durch die Störung erholt sich ein Ökosystem meistens, und es konnte mehrfach gezeigt werden, dass sich die Biodiversität oft nicht nur wieder etabliert, sondern auch steigert (Wohlgemuth et al., 2019). Durch die Sukzession und natürliche Konkurrenz können sich die Arten an die lokalen Umweltbedingungen langfristig anpassen, und die Störungen sind Teil des dynamischen Gleichgewichts eines Ökosystems (White, 1979).

Durch den Klimawandel verändert sich die Dynamik der Naturereignisse. In den Alpen nehmen beispielsweise die Intensität und Häufigkeit von Starkniederschlägen zu, im Allgemeinen wird es häufiger zu Extremereignissen kommen. Dadurch werden auch Gebiete betroffen sein, welche bisher verschont blieben (Cratschla, 2022). Da wichtige Faktoren wie Wassereintrag und Sedimentverfügbarkeit zunehmen werden, gelten auch Murgänge gegenüber dem Klimawandel als empfindlich. Durch den Gletscherschwund und vermehrte Steinschläge wird an neuen Stellen Material mobil, wodurch es zu erhöhter Murgang-Aktivität oberhalb der Baumgrenze und in bisher unbetroffenen Gebieten kommt (Jacquemart et al., 2024).

Ein in den Alpen weit verbreiteter natürlicher Prozess mit Störungs-Charakter sind Murgänge. Durch die Massenbewegung, Erosion und Ablagerung haben sie einen zerstörerischen Charakter. Aufgrund ihrer Intensität führen Murgänge oft zu einem Verlust von lebender Vegetation. Die schnell fließende Mischung aus Sediment, Geröll und Wasser reißt alles auf ihrem Weg mit sich und hinterlässt so eine stark veränderte und erodierte Landschaft (Yousefi und Imaizumi, 2024). In den Alpen spielt die alpine Vegetation in den Murganggebieten eine entscheidende Rolle, denn die Vegetationsdecke sorgt für Hangstabilität und reduziert so die Verfügbarkeit von Lockermaterial und die Anfälligkeit für Erosion. Das Wurzelsystem von Pflanzen kann Bodenpartikel zusammenbinden und die oberirdische Masse verringert die Bewegung von Sedimenten (Yousefi und Imaizumi, 2024). Diese Aussichten zeigen deutlich, dass es wichtig ist, zu verstehen, wie sich nach einem Murgang die Vegetation erholt und so einen wichtigen Beitrag zur Stabilität des gesamten Ökosystems leistet. Durch menschliche Wiederherstellungsmassnahmen werden nach Störungen oft Massnahmen wie Wiederansiedlung oder die Gestaltung von Lebensräumen getroffen, um die lokale Biota zu fördern. Forschung in diesem Themenbereich kann bei der Entscheidung helfen, ob nach einem Ereignis zur Wiederherstellung erforderlich sind (Foster et al., 2020).

In dieser Arbeit wird eine erste Analyse der Vegetation auf einer Murgangablagerung gemacht. Da sich die Ablagerung im Gebiet des Schweizerischen Nationalparks¹ befindet, ist sie gesetzlich vor menschlichen Eingriffen geschützt und es kann langfristig eine natürliche Entwicklung beobachtet werden.

¹ Im Folgenden abgekürzt mit SNP

1.2 Theoretische Grundlagen

Um einschätzen zu können, wie sich die Vegetation im untersuchten Gebiet entwickelt, ist es zunächst notwendig, den theoretischen Hintergrund der betroffenen Themen zu untersuchen.

1.2.1 Murgänge als natürliche Störungen

Bei einem Murgang handelt es sich um eine schnelle Massenbewegung, bei der eine Suspension aus Wasser, loser Erde, Steinen, organischer Masse und Luft mobilisiert wird und hangabwärts fließt (U.S. Geological Survey, o. D.). Um einen Murgang auszulösen, braucht es eine umfangreiche Akkumulation von Schuttmateriale mit ausreichend hohem Anteil an Feinmaterial, eine ausreichend steile Hangneigung und die kurzfristige Zufuhr von viel Wasser, beispielsweise durch Starkregen oder Schmelzwasser. Wenn die Schutthalde einen ausreichend grossen Anteil an Feinmaterial enthält, füllen sich bei einer kurzfristigen, hohen Zufuhr von Wasser die Poren, es entsteht ein positiver Porenwasserdruck und der Schutt beginnt sich breiartig hangabwärts zu bewegen (Ahnert, 2015). Die Ablagerung eines Murgangs besteht aus einer feinen Matrix, welche grobe, eckige Komponenten beinhaltet. Das Gefüge ist somit eine matrixgestützte Brekzie (Schlunegger et al., 2023). Das Fliessverhalten von Murgängen kann sich je nach Ereignis selbst am gleichen Standort stark unterscheiden (Tognacca, 1999), denn das Fliessverhalten ist von unterschiedlichsten Komponenten wie dem Wassergehalt, dem Gefälle, der Korngrössenzusammensetzung und der Schubwirkung abhängig. Muren können eine Geschwindigkeit von mehreren Zehnern von Metern pro Sekunde erreichen und dadurch sehr zerstörerische Auswirkungen haben (Ahnert, 2015).

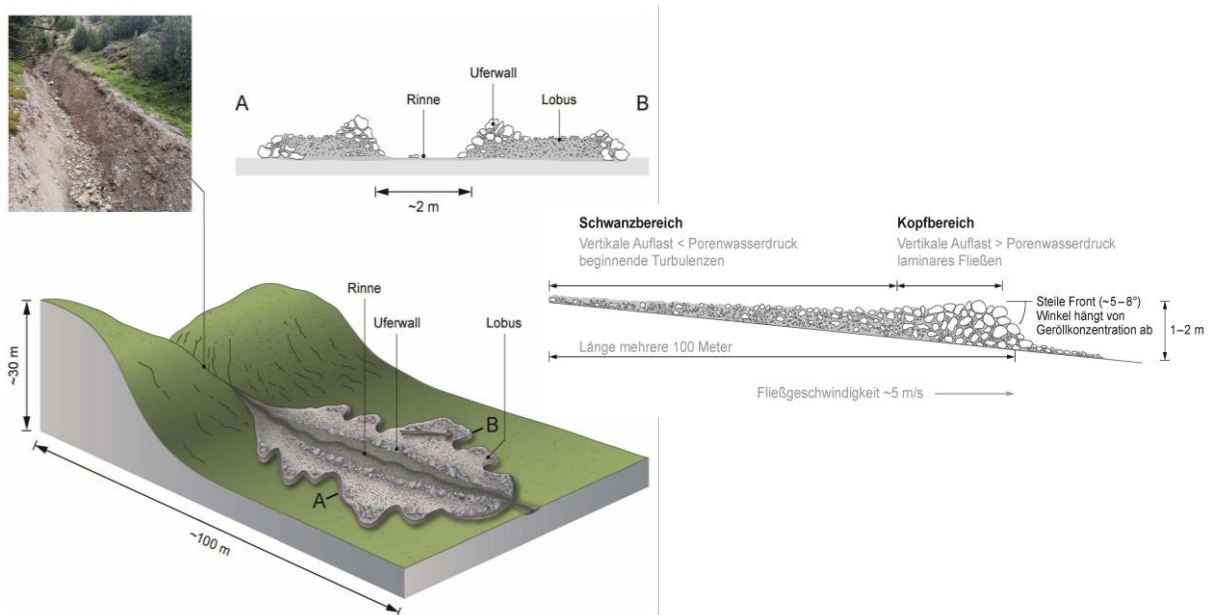


Abbildung 1 Schematische Darstellung eines typischen Murgangs (Schlunegger et al., 2023)

1.2.2 Sukzession der Vegetation in den Alpen

Pflanzengemeinschaften sind dynamische Systeme, welche auf Umweltfaktoren reagieren. Ökosysteme sind durch Veränderungen geprägt und die lebende Biomasse wird durch Störungen verändert, geprägt und erhalten. Die Resilienz eines Ökosystems beschreibt dessen Fähigkeit, bei Störungen seine ursprünglichen Funktionen wiederzuerlangen (Wohlgemuth et al., 2019). Je nach örtlichen Störungsereignissen passen sich die lokalen Organismen unterschiedlich an die Gegebenheiten an und prägen so den Charakter des Ökosystems. Seit den 80er Jahren sind die abrupt stattfindenden Veränderungen von Umweltbedingungen ein

zentrales Untersuchungsgebiet. Es konnte gezeigt werden, dass Störungen eine positive Wirkung auf die langfristige Aufrechterhaltung eines Ökosystems haben und dass eine hohe Artenvielfalt die Resilienz gegenüber Störungen stärkt (Wohlgemuth et al., 2019). Traditionelle Forschung basiert oft auf der Annahme, dass bei einer Zunahme der Ressourcenverfügbarkeit durch eine Störung aufgrund der Pionierarten auch eine Zunahme der Primärproduktion zu erwarten ist. Später stellt sich dann ein Gleichgewicht im Ökosystem ein. Falls die Ressourcenverfügbarkeit abnimmt, kann die Sukzession auch gestoppt werden oder eine Rückentwicklung eintreten. Moderne Störungstheorien lassen jedoch unterschiedliche Sukzessionspfade zu. Damit beziehen sie mit ein, dass Störungen über lange Zeit die Dynamik eines Ökosystems in vielerlei Hinsicht beeinflussen und verändern können und keinem linearen Schema folgen (Gough et al., 2024).

Bei Wohlgemuths (2019) relativer Definition wird eine Störung als «Ereignis [...], welches eine Abweichung von der normalen Dynamik eines Ökosystems darstellt» (Wohlgemuth et al., 2019, S.23) beschrieben. Somit sind Störungen Ereignisse, welche nicht den charakteristischen Prozessen eines Ökosystems entsprechen und diese verändern. Diese Definition kann jedoch den Begriff nicht klar abgrenzen, denn dazu müssten auch die Frequenz und die Magnitude der lokalen Ereignisse festgelegt werden. Je nach örtlichen Gegebenheiten gelten bei dieser Definition zum Beispiel Waldbrände nicht als Störung, da sie für das Ökosystem charakteristisch sind. Diese relative Definition erschwert den Vergleich zwischen der Störungs- und Regenerationsdynamik. Aus diesem Grund wird heute vielmehr eine absolute Definition verwendet. Hier wird die Störung als abrupte Veränderung der Zustandsgrößen betrachtet, unabhängig von der Vorhersehbarkeit und Frequenz. Eine Störung zeichnet sich somit durch den Verlust von Biomasse oder durch eine Veränderung der Ressourcenverfügbarkeit aus. Gemäss dieser Definition sind beispielsweise die meisten Waldbrände eine Störung (Wohlgemuth et al., 2019).

Die Arten eines Ökosystems sind gut an kleinere, regelmässig auftretende Störungen anpassen können und sogar aufgrund höherer Stabilität davon profitieren. An grössere Ereignisse sind die Arten meist gar nicht oder nur unspezifisch angepasst (Wohlgemuth et al., 2019).

Störungen können Ökosystemfunktionen einerseits fördern, aber auch hemmen oder grundlegend verändern. Sie wirken sich auf die unterschiedlichsten Ebenen eines ökologischen Systems aus. Aktuelle Forschungen zu Störungstheorien beschäftigen sich mit den komplexen Folgen, die Störungen in einem Ökosystem auslösen können. Die Komplexität des Themas ergibt sich daraus, dass sich keine konsistente Auswirkung von Störungen aufzeigen lässt, denn je nach Ausgangslage kann das Ökosystem selbst bei vergleichbaren Ereignissen sehr unterschiedlich reagieren (Gough et al., 2024). Es zeigt sich jedoch, dass natürliche Störungen oft die Artenvielfalt begünstigen. Durch die sich verändernden Umweltbedingungen entsteht Selektionsdruck und evolutive Anpassung, welche die Nischendifferenzierung von Arten fördert. Zudem sind oft dominante Arten von Störungen betroffen. Dadurch entsteht ein Vorteil für die weniger dominanten Arten (Wohlgemuth et al., 2019). Die Komplexität der modernen Störungstheorien und die oftmals positiven Auswirkungen der natürlichen Störungen auf Ökosysteme zeigen die Relevanz der Thematik.

Viele geomorphologische Prozesse können in diesem Sinne als Störung bezeichnet werden. Die Beziehung zwischen Geomorphologie und der Funktionsweise von Ökosystemen ist ein junges Forschungsgebiet, welches zunehmend an Wichtigkeit gewinnt (Rice et al., 2012). Auch Viles et al. (2008) verweisen auf Studien zum Thema, um zu zeigen, wie ökologische und geomorphologische Systeme auf Störungen reagieren, um daraus Erkenntnisse für

effektiveres Umweltmanagement zu gewinnen. Dies zeigt die hohe Relevanz der Thematik, nicht nur in der Forschung, sondern auch für die Umsetzung von Schutzmassnahmen und in der Umweltpolitik.

Ein zentrales Element der alpinen Ökosysteme ist die hochspezialisierte alpine Flora. Als Nahrungsquelle, Unterschlupf und Habitat für Organismen aller Art fördert sie die ökologische Interaktion und die Ökosystemdienstleistungen und ist somit für die lokale Ökologie unabdingbar (Yousefi und Imaizumi, 2024). Die heutige alpine Vegetation fing erst vor ungefähr 15 000 Jahren an, sich zu etablieren. Während der Eiszeit wurden höchstens die eisfreien Nunatakker von Pflanzen besiedelt. Nach dem Rückzug des Eises siedelten nicht nur ehemals alpine Arten die freien Flächen, sondern auch Arten aus dem arktischen Gebiet, aus den asiatischen Steppen und aus dem Himalaya. Heute kommen lediglich 20% der alpinen Arten nur in den mitteleuropäischen Alpen vor (Mertz, 2017). Durch die vielen unterschiedlichen Lebensräume in den Alpen unterscheiden sich die alpinen Arten stark in Bezug auf ihre Anpassung. Alpine Standorte fordern Anpassungen an extreme Lebensräume. Die Winter sind durch die Schneebedeckung und Kälte eine lange Ruhephase, die Aktivitätsphase im Sommer ist entsprechend kurz. Starke Schwankungen der Temperaturen, der Insolation und des Niederschlags sind sehr häufig. Im Laufe eines Tages kann sich eine Felswand selbst im Winter auf 30°C aufheizen, in einer klaren, vielleicht windigen Nacht sinkt die Temperatur leicht unter den Gefrierpunkt. Um den extremen Standortbedingungen zu widerstehen, passen sich die Pflanzen durch spezielle Mechanismen an. Beispielsweise ermöglicht der Polsterwuchs ein günstiges Mikroklima und die zwergwüchsige Vegetation profitiert von der Erdwärme und kann sich so auf Blüten- und Samenbildung fokussieren. Immergrüne Pflanzen können nach der Schneeschmelze oder bei fehlender Schneeüberdeckung im Winter schneller mit der Assimilation beginnen (Mertz, 2017).

Die subalpine Stufe umfasst den Übergang vom geschlossenen Wald zu der baumfreien Krummholz- und Zwergstrauchvegetation (Baumgrenze). Aufgrund der rauen Umweltbedingungen ist die Wachstumsphase auf 15–25 Wochen beschränkt und die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt ungefähr bei 0°C. Die meisten Gehölze sind Nadelhölzer wie Lärchen (*Larix*), Fichten (*Picea*) und Arven (*Pinus*) (Mertz, 2017).

Die alpine Stufe ist geprägt von Zwergstrauchbüschen wie der Legföhre (*Pinus mugo Turra subsp.² mugo*) und die Alpenrosen, hochspezialisierten Gräsern und Polsterrasen. Die durchschnittliche Jahrestemperatur liegt deutlich unter dem Gefrierpunkt. Aufgrund der rauen Verhältnisse können Sträucher und Stauden nur noch an geschützten und lokal günstigen Stellen vorkommen (Mertz, 2017).

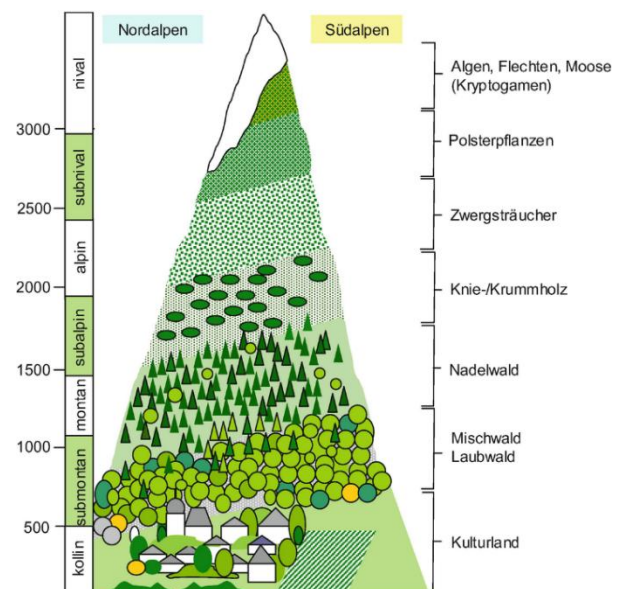


Abbildung 2 Schematische Darstellung der Vegetation entlang der alpinen Stufen (Kremer, 2024)

² Abkürzung: Subspezies

Weil die meisten Arten sehr spezifisch an Extremstandorte angepasst sind, reagieren sie entsprechend sensibel auf Veränderungen der Umwelt und eignen sich dadurch gut für die Untersuchung von alpinen geomorphologischen Prozessen.

Die Bergkiefer (*Pinus mugo Turra*) ist ein kleinwüchsiger Baum oder Busch. Sie ist unter den europäischen Kiefernarten die toleranteste gegenüber der Kälte und felsigem Untergrund und ist an die felsigen Lebensräume im Hochgebirge von Mittel- und Osteuropa angepasst. Sie wächst als Krummholzgesellschaft knapp oberhalb der Waldgrenze, an Lawinhängen oder an Felsen in mittleren Höhenlagen und spielt eine wichtige Rolle beim Erosionsschutz. Sie ist an trockene und felsige Standorte angepasst und benötigt viel Licht. Sie kann sich auf Substraten, welche stark wasserdurchlässig und nährstoffarm sind, verbreiten und ist unsensibel gegenüber der Lithologie des Untergrundes. Sie ist nicht nur an Lebensräume in zerklüftetem Massivgestein angepasst, sondern auch an die geringe Verfügbarkeit von Nährstoffen in Hochmoorgebieten. Dass sie auch geringe Temperaturen mit einem Jahresmittelwert von ungefähr 5° verträgt, zeigt deutlich, dass sie Extremstandorte besiedeln kann. Am erfolgreichsten kann sie sich knapp über der Baumgrenze etablieren und bildet da Strauchgesellschaften. Der Nadelbaum spielt eine wichtige Rolle beim Erosionsschutz, denn er kann durch das ausgedehnte Wurzelsystem lockere Böden befestigen und die bis an den Boden hängenden Äste schwächen Lawinen und Sturzbäche ab (Ballian et al., 2016).

Wächst *Pinus mugo Turra* oberhalb der Baumgrenze, befindet sie sich aufgrund von Konkurrenz durch andere Arten am Rand ihres möglichen geographischen Verbreitungsgebiets. Weil die Art gut an Extremstandorte angepasst ist, kann sie dort gedeihen. Falls es jedoch zu rapiden lokalen Klimaänderungen kommt, hat sie sehr geringe Möglichkeiten, sich weiter anzupassen. Deshalb reagiert sie sensibel auf Klimaschwankungen und ist ein guter Indikator für Klimaforschung (Palombo et al., 2014).

1.2.3 Vegetation im Zusammenhang mit Naturereignissen

Die alpine Vegetation spielt auch eine wichtige Rolle bei der Eindämmung von Naturgefahren. Beispielsweise wird die Hangstabilität gefördert, denn die Vegetation erhöht die Bodenkohäsion und die Wurzeln können mechanisch Geröll fixieren. Auch kann der Bewuchs die lokale Rauheit erhöhen, Hindernisse darstellen und so das Fließverhalten von Naturereignissen beeinflussen. Diese positiven Eigenschaften werden durch Bio-Engineering gezielt eingesetzt, um vor Extremereignissen wie Hochwasser und Murgänge zu schützen (Wang et al., 2017). Diese Methoden sind besonders interessant in Murgang-Gebieten, denn fehlt die Vegetation (z. B. durch Brände oder vorangegangene Murgänge), wird die Anfälligkeit der Hänge für Murgänge verstärkt (U.S. Geological Survey, o. D.).

Murgänge haben innert kürzester Zeit einen massiven Einfluss auf die lokale Vegetation. Das heisst, selbst wenn sie nur sehr selten auftreten, können sie die lokale Vegetation langfristig stark verändern (Pabst und Spies, 2001). Die unmittelbaren Folgen der Störung sind für die betroffene Biota meist katastrophal. Das Fließverhalten eines Murgangs hängt von der Zusammensetzung ab und die Erholungsmuster hängen stark von den standortspezifischen Bedingungen und der Wettersituation während des Ereignisses ab (Forster et al., 2020). Trotz des zerstörerischen Charakters eines Murgangs werden mehrheitlich nach ein paar Jahren die ökologische Sukzession und die Etablierung von Pionierarten beobachtet. Nach der Stresssituation und den Veränderungen im Lebensraum können im Gebiet auch günstige Situationen für die Etablierung von Pflanzen entstehen. Zum Beispiel in Mikrohabitaten hinter grossen Felsen oder in Vertiefungen. Diese Mikrohabitate können als Schutzzone während

des Murgangereignisses dienen und die bestehende Vegetation gegen die volle Wucht des Murgangs schützen. Vegetation, welche im Oberboden überlebt hat und ihr Wurzelsystem behalten hat, kann sich nach dem Ereignis schnell wieder etablieren. (Yousefi und Imaizumi, 2024). Pflanzenbestandteile wie Rhizome werden flussabwärts getrieben und durch den Sedimenttransport entstehen neue Habitate für die Ansiedlung von Pflanzen. Wichtige Faktoren, welche die Vegetationsentwicklung nach dem Ereignis beeinflussen, sind die Artenzusammensetzung, die intakte Vegetation als Ausgangslage für die neue Generation (z. B. durch Rhizome oder Samen), die Substratstabilität und die Nährstoffzusammensetzung (Pabst und Spies, 2001). Mit einer guten Ausgangslage kann sich dann eine umfangreichere Vegetation ansiedeln. Somit wird deutlich, dass jedes Ökosystem anders auf eine Störung durch einen Murgang reagiert. Wie auch Forster et al. (2020) betonen, haben Störungen oft positive Auswirkungen auf die langfristige Produktivität und biologische Vielfalt eines Ökosystems. Die Geschwindigkeit der Erholung ist stark standortabhängig. Falls schwerwiegende oder kumulative Ereignisse Quellpopulationen oder wichtige Habitate auslöschen, können die Auswirkungen auf die Ökosysteme sehr langfristig sein.

Die Vegetation erholt sich am schnellsten, wenn nach einem Murgangereignis keine weiteren nachfolgen. Die Studie von Yousefi und Imaizumi (2024) zeigt, dass kumulative Störungen, also häufige Murgangereignisse in kurzer Zeit, zu einer Abnahme der Vegetationsdecke führen und die Erholungsprozesse abgeschwächt werden. Zonen mit verhältnismässig kleinerer Korngrösse und einem geringen Auftreten von Murgängen weisen ein erhöhtes Potenzial für erfolgreiche Vegetationsetablierung auf (Yousefi und Imaizumi, 2024).

In der Studie von Pabst und Spies (2001) wurden die meisten Arten, die in den in unbetroffenen Gebieten beobachtet wurden, im Lauf der Jahre auch in den betroffenen Gebieten gefunden. Dies bedeutet, dass sich die neue Vegetation der umliegenden stark ähnelt. Jedoch entwickelten sich die unterschiedlichen Arten zeitlich verschieden, was bedeutet, dass sich die einen Arten bereits in den ersten Jahren etablierten und allenfalls nach ein paar Jahren wieder verschwinden, während andere Arten sich erst nach mehreren Jahren etablierten. Die Wiederbesiedlung an sich erfolgt rasch, bereits nach zwei Jahren wurden 80% aller Arten identifiziert. Es konnte festgestellt werden, dass viele Pflanzen aus Samen entstanden. Daraus wird geschlossen, dass die Samen in Samenbanken im Substrat überleben. Die Zusammensetzung der Erstbesiedler ist ein wichtiger Faktor für die spätere Vegetationszusammensetzung (Pabst und Spies, 2001).

1.3 Stand der Forschung

Murgänge sind in der Geomorphologie weltweit breit untersucht. Dies zeigt sich an den vielen Ergebnissen bei der thematischen Suche in Online-Bibliotheken. Es gibt auch einige Studien zu der stabilisierenden Wirkung von Vegetation auf Murgangablagerungen, da Vegetation eine entscheidende Rolle im Erosionsschutz spielt (Wang et al., 2017). Es gibt einen grossen Mangel an Forschung zu der Erholung von Vegetation auf Murgangablagerungen. Die geringe bisherige Forschung hat sich vor allem auf Vegetationsentwicklung in Bezug auf Erdrutsche fokussiert (Yousefi und Imaizumi, 2024) (auch in Pabst und Spies, 2001).

In diesem Zusammenhang wird in der Forschung auch die Wechselwirkung zwischen der Vegetation und der Entwicklung von Landformen besprochen (Osterkamp und Cliff, 2012). Die Studie zeigt, dass der Transport und die Ablagerung von Pflanzenmaterial bis anhin kaum erforscht wurden. Mit dem Aufruf, in der Disziplin mehr anzustreben als lediglich die Morphologie

zu vermessen und eine Vegetationsaufnahme zu erstellen, verweisen (Osterkamp und Cliff (2010) auf die Herausforderungen, die der globale Wandel mit sich bringt. Um dafür geeignete Lösungsansätze zu finden, müssen die komplexen Wechselwirkungen zwischen der belebten und unbelebten Welt besser verstanden werden. Die Untersuchungen des Murgangs Buffalora streben eine Analyse in diesem Themenbereich an. Die beobachteten Zusammenhänge zwischen der Vegetation und der Ablagerung in diesem Gebiet können Hinweise für die lokale Dynamik sein und weiterführende Forschung kann die Fragestellung vertiefen.

Es gibt vereinzelte Studien, welche sich mit der Vegetationssukzession nach Murgängen beschäftigen, doch sie unterscheiden sich alle in Bezug auf den Landschafts- und Vegetationstyp, den Standort und die lokalen Bedingungen. Die Studie von Pabst und Spies (2001) untersuchte die Vegetationsentwicklung auf einer Murgangablagerung in Oregon Coast Range. Die Vegetation wurde innerhalb von definierten Parzellen in betroffenen und unbetroffenen Bereichen als Arten identifiziert und gelistet. Das Untersuchungsgebiet wurde während 10 Jahren beobachtet, zudem wurden die Parzellen je nach Untergrund kategorisiert (Pabst und Spies, 2001). Yousefi und Imaizumi (2024) haben untersucht, welche Faktoren die natürliche Erholung der Vegetation in von Murgang betroffenen Gebieten beeinflussen und welche Rolle dabei die Sedimentdynamik spielt. Die Studie legt einerseits Fokus auf die Bewertung des Zustandes der natürlichen Vegetationsbedeckung in Murgangfächern und Ablagerungsgebieten, andererseits auf die Beziehung zwischen der Sedimentdynamik und der Erholung der natürlichen Vegetation. Um die Vegetationsklasse, die Korngrößenverteilung und das Ausmass der Murgangereignisse zu beurteilen, wurden moderne Methoden wie Support Vector Machine (SVM) Klassifizierung, Korngrößenanalyse, Genauigkeitsbewertung (Bewertungen der Genauigkeit der Bildklassifizierung und der Korngrössenmessungen), Murganganalyse (z. B. betroffene Flächen) und Hotspot-Analyse (Verteilungsmuster der Sedimente) angewandt (Yousefi und Imaizumi, 2024). Foster et al. (2020) untersuchten in der südwestlichen Region Washingtons Murgänge in zwei benachbarten Bächen, welche von Stürmen ausgelöst wurden. Die Bäche wurden nach der Störung 6 Jahre lang untersucht, um die Erholung des Ökosystems zu beobachten und festzustellen, welche Faktoren die Widerstandsfähigkeit beeinflussen. Die Murgänge verliefen entlang von bestehenden Fließgewässern. Damit sind die Flussbetten und das Flussökosystem verändert. Das Besondere an der Studie ist, dass sie einen Vorher-nachher-Vergleich darstellt, da zufälligerweise bereits vor dem Ereignis Daten erhoben wurden. Durch Einfluss der Murgänge wurden bei beiden Bächen Boden, Gesteine und Nadelbäume weggetragen. Dies führte zu einer Verbreiterung des Gerinnes sowie zu höheren Wassertemperaturen aufgrund der Sonneneinstrahlung (Foster et al., 2020).

Die Einführung in den theoretischen Kontext der Thematik zeigt, dass einerseits in den Disziplinen Geomorphologie und Biologie viel Grundlagenforschung zu den Themen Murgang und Störungsökologie gemacht wurde, die vertiefende und zusammenführende Forschung jedoch oft fehlt. Zwar gibt es einige Studien zur Vegetationsentwicklung auf Ablagerungen, doch die geringe Anzahl an Studien zeigt, dass die Biogeomorphologie ein wenig erforschtes Feld ist.

1.3.1 Forschungslücken und Relevanz

Der Stand der Forschung zeigt, dass themenrelevante Forschung stattfindet und in den letzten Jahrzehnten auch die Verbindung zwischen Geomorphologie und Biologie erforscht wird. Studien, welche die Vegetationssukzession auf Ablagerungen erforschen, sind oft sehr spezifisch, weil sie sich auf einen bestimmten Standort konzentrieren. Da sich geomorphologische Ablagerungsprozesse insgesamt, aber auch Murgangereignisse an sich sehr stark unterscheiden

können, ist es schwierig, aus den einzelnen Studien allgemeingültige Aussagen abzuleiten. Aus diesem Grund betont Gough et al. (2024) auch, dass moderne Störungstheorien keinem linearen Schema folgen sollen und mehrere Sukzessionspfade zulassen müssen. Trotz der wichtigen Funktionen der alpinen Vegetation gibt es bisher keine Studie zu der Vegetationsentwicklung auf einer Murgangablagerung im alpinen Kontext. In diesem Zusammenhang sind zwar Studien häufig, welche die stabilisierende Wirkung von Vegetation auf einer Ablagerung untersuchen, wie sich jedoch die Vegetation nach dem Ereignis erholt, ist kaum erforscht. Konkret fehlt Forschung zu Vegetationssukzession auf Murgangablagerungen im alpinen Kontext, es fehlen Vorher-Nachher-Vergleiche sowie Ereignisvergleiche bei gleichen Vegetationsgesellschaften und Langzeitstudien.

Da ein Naturereignis im anthropogenen Kontext häufig als zerstörend oder schädlich beurteilt wird, gilt es, diesen Blickwinkel zu hinterfragen und zu untersuchen, inwiefern diese Ereignisse sich auf Ökosystemebene auswirken. Ein Paradigmenwechsel kann dazu führen, dass Störungen, welche keine menschlichen Infrastrukturen bedrohen, als wichtiges Element für die natürliche Dynamik eines Ökosystems betrachtet werden können. Dies ist wichtig, weil Störungen häufig eine positive Wirkung auf die Resilienz und Gesundheit eines Ökosystems haben. Um zu verstehen, welche Elemente besonders förderlich und damit schützenswert sind, muss die Vegetationsdynamik untersucht werden. Unter diesem Gesichtspunkt kann beispielsweise das regionale Umweltmanagement entsprechend angepasst werden. So bietet die Forschung in unbesiedelten Gebieten politische Argumente, um die natürliche Dynamik eines Ökosystems zu erhalten und zu fördern. Und wenn die Vegetationssukzession besser verstanden wird, können auch in besiedelten Gebieten gezielte Massnahmen getroffen werden, um beispielsweise die Schutzfunktionen alpiner Vegetation zu fördern.

1.4 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit wird eine statistische Vegetationsanalyse einer jungen Murgangablagerung im alpinen Kontext gemacht. Die Ergebnisse werden anhand des theoretischen Hintergrundes interpretiert, mit dem Ziel, erste Muster zu identifizieren. Da die vorhandenen Vegetationsdaten eine Momentaufnahme ein Jahr nach dem Ereignis abbilden und keinen zeitlichen Verlauf zeigen, wird in der Arbeit die Erkennung erster räumlicher Muster angestrebt. Diese Ergebnisse können als Anhaltspunkte für weiterführende Forschungsprojekte dienen, welche auch die zeitliche Dimension aufgreifen. Grundsätzlich soll die Arbeit dazu beitragen, die vorhandenen Forschungslücken im Gebiet zu schliessen. Mit dem Fokus auf die Art *Pinus mugo* kann gezielt die räumliche Verbreitung untersucht werden. Durch statistische Korrelation und Darstellungen der Verteilung in Bezug auf Klimadaten, Artenvielfalt, Ablagerungshöhe und Korngrösse können Verteilungsmuster gezeigt werden. Folgende Forschungsfragen ergeben sich:

- Welche Verteilungsmuster der Vegetation zeigen sich ein Jahr nach dem Ereignis? Zeichnet sich die Verbreitung von *Pinus mugo* von der Verbreitung anderer Arten ab?
- Gibt es Zusammenhänge zwischen der Korngrösse und dem Vorkommen von *Pinus mugo*?
- Beeinflusst die Mächtigkeit der Ablagerung die Verteilung der Vegetation?
- Können durch das Ereignis positive Effekte auf die Vegetation, wie etwa eine Zunahme artenreicher Flächen, identifiziert werden?

2 Untersuchungsgebiet, Daten

2.1 Untersuchungsgebiet

Das untersuchte Gebiet umfasst die nähere Umgebung der Ablagerungen des Murgangs Buffalora, welche sich im östlichen Teil des Schweizerischen Nationalparks befindet.

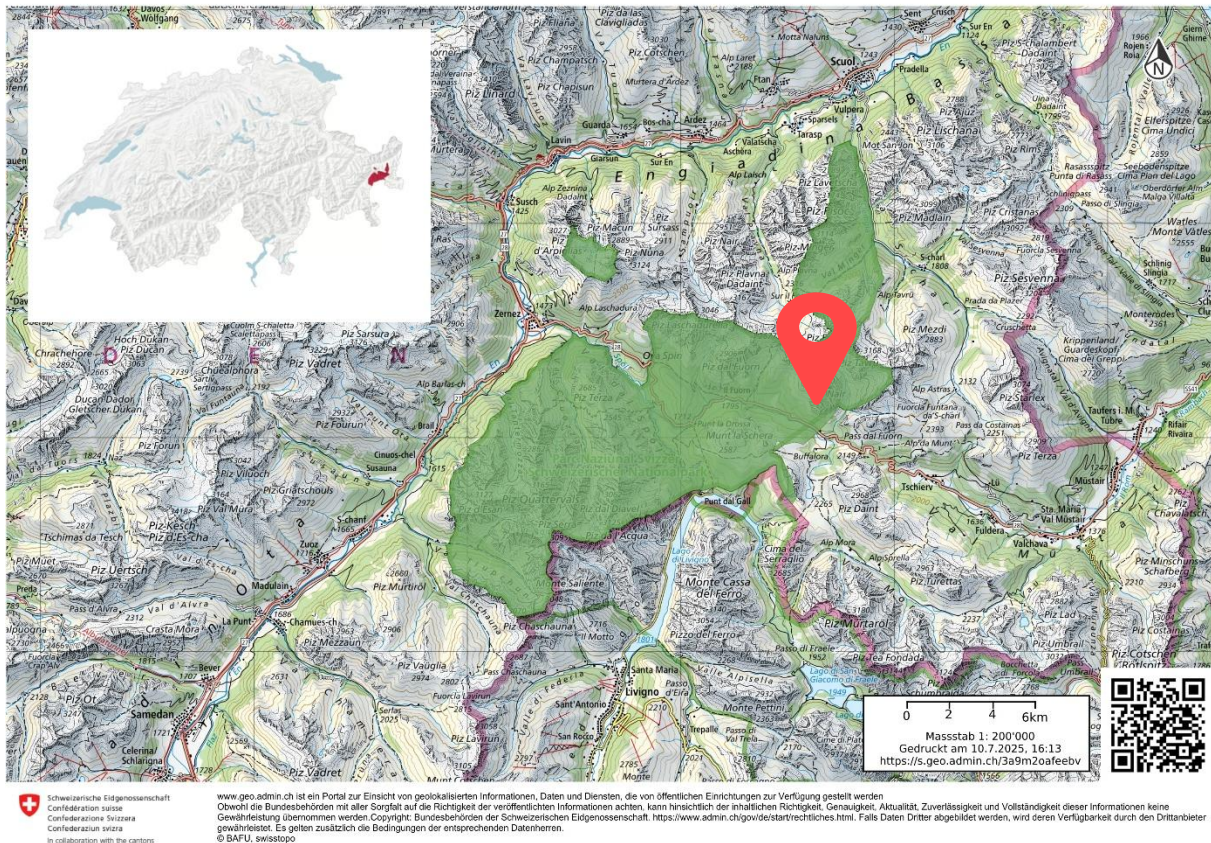


Abbildung 3 Standort der untersuchten Murgang- Ablagerung. Grün: Gebiet des Schweizerischen Nationalpark (swisstopo a, 2025), Nationaler Überblick Standort Nationalpark (Stiftung Schweizer Pärke, o.D.)

2.1.1 Kontext Schweizerischer Nationalpark

Der Schweizerische Nationalpark liegt im Kanton Graubünden und umfasst ein Gebiet von 170km², und umfasst eine Höhendifferenz von 1400m.ü.M. (Clemgia/ Scuol) bis 3174m.ü.M. (Piz Pisoc). Die Landschaft, Tiere, Pflanzen, Lebensräume und die natürlichen Prozesse sind gemäss internationaler Naturschutzunion vor jeglichen menschlichen Eingriffen geschützt. Um die natürlichen Prozesse so weit wie möglich zu bewahren, werden menschliche Eingriffe wie Schutzmassnahmen oder Unterhaltsarbeiten auf ein Minimum beschränkt und mit strengen Parkrichtlinien wird die Natur vor dem menschlichen Einfluss geschützt (Schweizerischer Nationalpark b., o. D.). Ein Teil des SNP ist Teil der UNESCO Biosfera Engiadina Val Müstair. Sie hat zum Ziel, die biologische Vielfalt zu fördern, die traditionellen Kulturen zu bewahren und wirtschaftliche Entwicklung zu bewahren. Der Murgang Buffalora liegt im Gebiet der Kernzone. Diese Zone soll eine Schutzzone für die Erhaltung biologischer Vielfalt sein (Schweizerische UNESCO-Kommission, o.D.). Nebst dem aktiven Schutz ist ein weiteres wichtiges Ziel des SNP die Förderung von Forschung im Parkgebiet. Dazu werden beispielsweise Daten zur Darstellung langfristiger Entwicklungen erhoben (Schweizerischer Nationalpark, 2008). Die Forschung, welche durch den SNP initiiert oder unterstützt wird, umfasst Themen wie

Langzeitbeobachtungen von Flora und Fauna, Veränderungen der Landschaft und der biologischen Vielfalt sowie Auswirkungen des Klimawandels und den Schutz von natürlichen Prozessen (Koenig, 2024).

Die Vegetation des Nationalparks umfasst verschiedene alpine Stufen und besteht zu 28% Wald (davon 99,5% Nadelwald) und 21% alpinen Matten, der Rest des Gebietes ist vegetationsfrei (Geröll, Fels, Hochgebirge) (Schweizerischer Nationalpark b., o. D.). Die Vegetation im SNP wird seit über hundert Jahren beobachtet und erforscht. An verschiedenen Stellen im Park wurden Dauerbeobachtungsflächen erreicht, welche wertvolle Langzeitbeobachtungen ermöglichen (Schweizerischer Nationalpark c., o. D.).

Das Ofenpassgebiet ist geprägt von der Bergföhre *Pinus mugo Turra*. Die Samen sind durch einen Flügel windverbreitet und können auch auf den trockenen, steinigen Böden keimen (Schweizerischer Nationalpark a., o. D.). Nebst der Bergföhre kommen im Parkgebiet auch ihre beiden Unterarten vor. Die Legföhre *Pinus mugo Turra subsp. mugo* ist der einzige Nadelbaum, welcher im Nationalpark trotz des Schneedrucks, den Lawinen, der Bewegung der Erdoberfläche und den Steinschlägen an steilen Hängen dauerhaft wachsen kann. Als Pionierin besiedelt die aufrechte Bergföhre *Pinus mugo subsp. uncinata* (DC.) *Domin* schnell basenreiche Schotterflächen an Bachrändern und auf Ablagerungen von Murgängen (Bezzola, 2023).

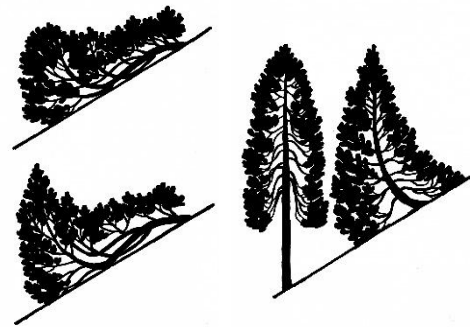


Abbildung 4

Links: Legföhre/ Latsche *Pinus mugo Turra subsp. Mugo*

Rechts: Aufrechte Bergföhre *Pinus mugo subsp. uncinata* (DC.) *Domin* (Bezzola, 2023)

Weil ein Teil der Geologie des SNP aus Dolomit besteht, welcher leicht verwittert und sich als Schutthänge am Fuss von Felsen ansammelt, kommt es im Parkgebiet häufig zu Murgängen. Das wassergesättigte Geröll fliesst die steilen Hänge herunter, meist entlang bestehender Rinnen (Koenig, 2024).

2.1.2 Das Untersuchungsgebiet

Das Murganggebiet Buffalora befindet sich in der Nähe der östlichen Parkgrenze, unterhalb des Piz Nair (3010m.ü.M) und oberhalb der Ofenpasstrasse. Das alpine Gebiet ist geprägt durch extreme Wetterbedingungen und starke Erosion. Der dolomitische Untergrund ist karg und das Klima trocken. Aufgrund der fehlenden Vegetationsdecken wird das Lockermaterial nicht zurückgehalten und es bilden sich Schutthalden am Fuss der Felsen. Das Klima ist geprägt von tiefen durchschnittlichen Jahrestemperaturen (ungefähr bei null), von kühlen Winden und kurzfristigen Hitzeereignissen (Koenig, 2024). Durch die natürlichen Prozesse Erosion, Transport und Ablagerung ist das Gebiet ständig auf unterschiedlichen Skalen im Wandel. Es findet ein stetiger Transport von Gestein, Sand und sehr feinen Partikeln statt und es lassen sich grossflächige Ablagerungsphänomene wie Schwemmfächer, Talfüllungen oder Moränen beobachten. Das Material wird durch Temperaturschwankungen, Frostsprengungen, Niederschläge und chemisch-physikalische Prozesse verwittert. Anschliessend wird es durch treibende Kräfte wie Wind, Wasser, Lawinen und Eis transportiert und im flacher werdenden Gelände abgelagert. Forschung über die Auswirkungen des Klimawandels zeigt, dass Extremwetterereignisse im Gebirge und damit auch Murgänge häufiger werden (Koenig, 2024).

Die blauen Bereiche auf Abbildung 5 repräsentieren Zonen biogener Sedimentgesteine und Evaporiten. Dies sind die Sedimentgesteine im Massiv des Piz Nair, auch Müschauns-Dolomit genannt. Das Material wird als spröde beschrieben, es verwittert schneller als kristallines Gestein. Aus diesem Grund kommt es zu der Ansammlung von viel losem Material unterhalb. Quartäre Lockergesteine prägen den gelben Bereich. Hier sammeln sich Hangschutt, Felsblöcke, Konglomerate, Brekzien und Geschiebelehm von Moränen. Der geologische Untergrund im braunen Bereich besteht aus klastischen Sedimentgesteinen (Koenig, 2024).

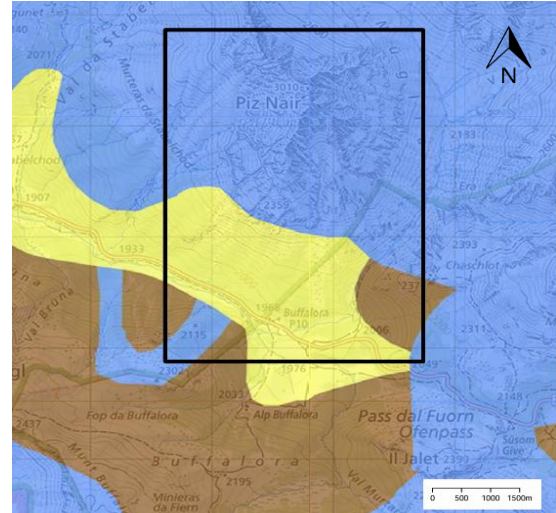


Abbildung 5 Karte des Geologischen Untergrunds des Untersuchungsgebiets (Koenig, 2024)

2.1.3 Das Ereignis

Der Murgang wurde am Nachmittag des 25. Juli 2022 durch einen lokalen, extremen Gewitterregen ausgelöst. Das Klima wird an diesem Tag mit 24°C auf 2000m.ü.M als aussergewöhnlich warm bezeichnet (Wipf et al., 2024). Das Klimabulletin von MeteoSchweiz beschreibt den Sommer als den zweitwärmsten seit Messbeginn 1864. Nebst Hitzewellen kam es im Sommer 2022 zu massiven Niederschlagsmangel (MeteoSchweiz, 2022). Die die Niederschlagssummen sind für den inneralpinen Standort aussergewöhnlich, die meteorologische Station Buffalora verzeichnete innerhalb einer Stunde 25.8mm Niederschlag (Wipf et al., 2024). Der Murgang ereignete sich in mehreren Wellen, entlang einer Hauptfliesslinie von 2'947,97m, Richtung Ofenpasstrasse. Im oberen Bereich wurden Bäume ausgerissen und entrindet. Im unteren Bereich verteilte sich die Strömung durch den Wald, jedoch ohne ihn zu zerstören. Indikatoren wie das Alter der betroffenen Bäume, die Ablagerungshöhe und Luftaufnahmen betonen die Seltenheit des Ereignisses, das Wiederholungsintervall scheint bei 100 Jahren zu liegen. Der Murgang wird als wenig viskos mit hohem Anteil an Wasser und feinen Bestandteilen wie Sand und Kies beschrieben. Die stehengebliebenen Bäume in der Mitte der Ablagerung verweisen auch auf das eher flüssige Regime. Die Fläche der Ablagerungen wird von Koenig (2024) auf 80 805,71 m² abgemessen, das abgelagerte Volumen umfasst 8882.3m³.



Abbildung 6 Ablagerung des Murgang Buffalora im Bergföhrenwald

2.1.4 Forschung zum Murgang Buffalora

Um die Reaktion des Ökosystems auf die Veränderungen durch den Murgang zu beobachten, wurden durch Mitarbeitende des Schweizerischen Nationalparks Flächen eingemessen, welche eine langfristige Beobachtung der Vegetation ermöglichen. Zusammen mit weiteren Daten, die in Zusammenhang mit dem Ereignis gesammelt wurden, bieten sie die Möglichkeit, interdisziplinäre Fragen nach Vegetationsentwicklung und Sukzession in sich verändernden Gebirgsräumen zu untersuchen. So können Erkenntnisse über die langfristigen Auswirkungen der Störung auf das Ökosystem gewonnen werden (Wipf et al., 2024). Inzwischen laufen einige Forschungsprojekte, welche sich auf das Ereignis beziehen. Die Studie von Koenig (2024) zielt darauf ab, mithilfe von Geländemodellen, Datenanalyse und hochauflösenden Luftbildern murganggefährdete Gebiete im SNP zu identifizieren und die Machbarkeit von geomorphologischen Vorhersagen zu bewerten. Dazu wurde unter anderem das Gebiet des Buffalora-Murgangs untersucht und Daten wurden erhoben. Kolb (2025) untersucht mit Fokus auf die Korngrössenanalyse die Entwicklung der physischen Eigenschaften der Murgangablagerung. Hier wird deutlich, dass Bereiche mit hoher Ablagerungsmächtigkeit grössere Korngrössen aufweisen und Bereiche mit geringerer Ablagerungsmächtigkeit stärker von Vegetation beeinflusst ist.

2.2 Daten

Die vorliegende Arbeit verwendet hauptsächlich Daten, welche durch den SNP bei Feldarbeiten generiert wurden und dem Geographischen Institut der Universität Bern zur Verfügung gestellt werden. Mit dem Ziel, mit diesen Daten erste Erkenntnisse über die Vegetationsdynamik zu gewinnen, werden auch die Möglichkeiten bei der Themenfindung eingegrenzt. Die Daten beinhalten Drohnendaten, Fotos der Feldarbeit, die Daten von Klimasensoren und eine Vegetationsaufnahme.

2.2.1 Drohnendaten

Mithilfe von Drohnenaufnahmen wurden ein digitales Höhenmodell sowie ein digitales Geländemodell erstellt. Zudem beinhalten die Daten ein georeferenziertes Orthofoto, welches die Ablagerungsfläche abbildet. Einzelheiten zu dem Drohnenflug und den Aufnahmen wurden in einem Report festgehalten. Die Aufnahmen wurden am 22.08.2022 gemacht und haben eine Auflösung von 1.51cm / Pixel (Rossi, 2024).

2.2.2 Plots

Während vier Tagen Feldarbeit im Juli und September 2023 und August 2024 wurden Vegetationsdaten und Klimadaten generiert. Im Jahr 2023, ein Jahr nach dem Ereignis, wurden Plots für die Vegetationsaufnahme errichtet. Insgesamt wurden 30 Plots in der Grösse von 1 × 1 m errichtet (Siehe Abbildung 7). Pro Höhenstufe wurden drei dieser Plots in drei unterschiedlichen Ablagerungsmächtigkeiten installiert. Es wurde je ein Plot (im Folgenden als C bezeichnet) an einer nicht vom Murgang betroffenen Stelle installiert, ein Plot wurde an einer Stelle mit geringer Ablagerungsmächtigkeit (weniger als 0.5m, im Folgenden als L bezeichnet) und ein Plot bei hoher Ablagerungsmächtigkeit (mehr als 1m, im Folgenden als H bezeichnet). Von der Ofenpasstrasse aus wurden 10 Höhenstufen abgemessen, die Höhendifferenz zwischen den Plots beträgt mindestens 20 Meter (siehe Abbildung 8). Die Beschriftung der Plots in den Datensätzen setzt sich aus dem Buchstaben für die Ablagerungskategorie (C, L, H) und der

Zahl für die Höhendifferenz zum Nullpunkt (Ofenpasstrasse) zusammen. Die Informationen zu den Ablagerungsmächtigkeiten stammen aus dem digitalen Geländemodell (Rossi, 2024). Die dazugehörige Textdatei dokumentiert die Vorgehensweise bei der Installation und beim Auslesen und beinhaltet auch Beobachtungen während der Feldarbeit. Es gibt jeweils mindestens zwei Fotos von den Plots, erkennbar sind das Substrat, der Untergrund und die Vegetation.

2.2.3 Temperatur und Feuchtigkeit

Bei jedem dieser Plots wurde ein Logger installiert, welcher während ungefähr eines Jahres von Juli 2023 bis August 2024 Daten zur Umgebungstemperatur, der Luftfeuchtigkeit und dem Taupunkt aufzeichnete. Die Daten wurden stündlich aufgenommen. Gemäss Report konnten nicht alle Logger ausgelesen werden, weitere zeigen fehlerhafte Daten. Nicht alle Logger starten und enden zum selben Zeitpunkt (Rossi, 2024).



Abbildung 7 Beispiel eines Plots (L240), oben links im Holzpflöck sind die Logger eingebaut (Rossi, 2024)

2.2.4 Vegetation

Bei jedem Plot wurde eine Vegetationsaufnahme gemacht, wobei auf einer Excel-Liste die vorkommende Vegetation mit Art, Gattung und Spezies gemäss unterschiedlichen Taxonomien festgehalten wurde. Die Anzahl der Exemplare wurde nicht festgehalten, bei der Art *Pinus* wurden jedoch zusätzlich die Sämlinge in den Plots gezählt. Durch Referenzierung lässt sich jede Beobachtung einem Plot zuordnen. Notiert wurden auch die Koordinaten und Höhen der Plots (Rossi, 2024).

2.2.5 Korngrößen und Hangneigung

In der Arbeit von Kolb (2025) wurden anhand des selben Datenpakets von Rossi (2024) die Korngrößen der Plots durch photogranulometrischer Korngrößenanalyse mit dem Programm BASEGRAIN identifiziert. Diese Daten werden für die vorliegenden Arbeit unverändert übernommen. Durch topografische Analyse mit QGIS wird bei Kolb (2025) die Hangneigung der Plots identifiziert, auch diese Daten werden direkt übernommen.

Übersicht

Standorte der Plots nach Ablagerungskategorie

- Plots mit *Pinus mugo* subsp. *uncinata*
- ▲ Plots mit *Pinus mugo* Turra
- Ablagerungskategorie H
(Hohe Ablagerungsmächtigkeit, < 1m)
- Ablagerungskategorie L
(Niedrige Ablagerungsmächtigkeit, > 0.5m)
- Kontrollplots, nicht vom Murgang betroffen

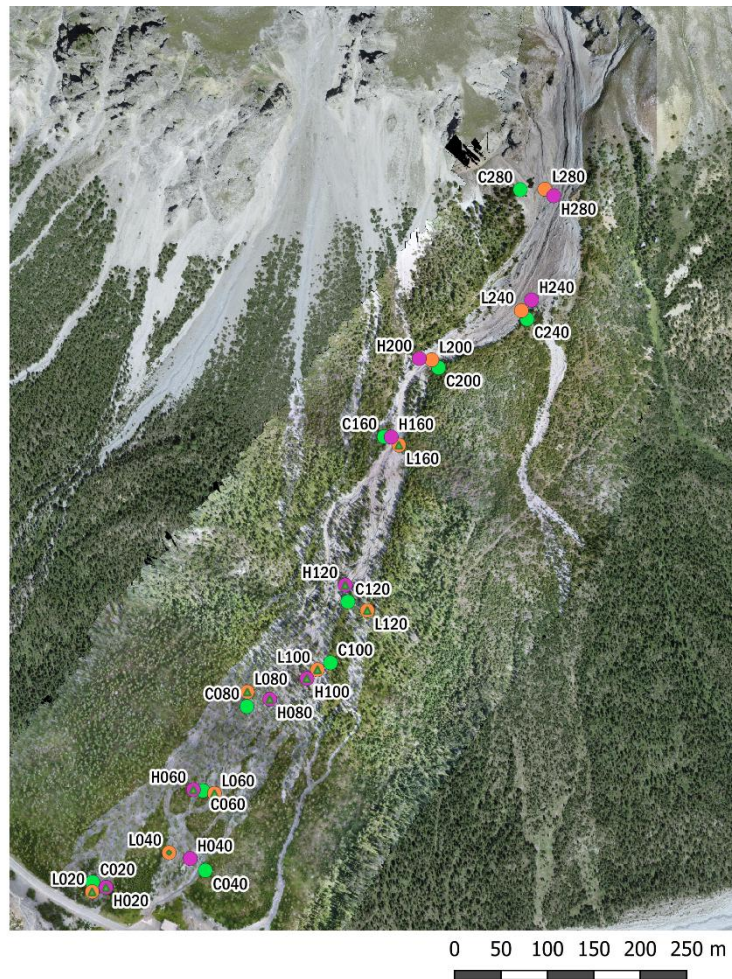


Abbildung 8 Verteilungsübersicht der Untersuchungsplots entlang der Murgangablagerung, unten links die Ofenpassstrasse als Nullpunkt



Abbildung 9 Nahaufnahme Standorte Plots



Abbildung 10 Variabilität der Ablagerungsmächtigkeit

3 Methoden

3.1 Literaturrecherche

Durch die Literaturrecherche mithilfe von Studien, Büchern, Zeitschriften und Internetrecherchen wurde eine wichtige Wissensgrundlage für die Arbeit geschaffen. Das Produkt der Recherche zeigt sich einerseits im Kapitel Einleitung bei den theoretischen Grundlagen und dem Stand der Forschung, andererseits wurden die gewonnenen Informationen auch in die Fragestellung, die statistische Analyse und die kritische Auswertung integriert. Für die Suche wurde unter anderem die nationale Suchmaschine Swisscovery verwendet. Gemäss dem Schneeball-System wurden bei themenrelevanter Lektüre die passenden Referenzwerke aufgegriffen und weiterverfolgt. Allgemeine Infos oder spezifische Webseiten oder Studien wurden durch die Suchmaschine Google gefunden.

3.2 Geodatenanalyse

QGIS wurde verwendet, um die Standorte der Plots zu visualisieren und Kartenmaterial herzustellen. Dazu wurden die passenden Ausschnitte des Orthophotomosaik SWISSIMAGE 10 von Swisstopo eingelesen. Darüber wurde das georeferenzierte Orthofoto der Murgangablagung gelegt. Für die Darstellung der Plots wurden deren Koordinaten eingelesen und die entsprechenden Punkte werden nach Ablagerungskategorie durch unterschiedliche Farben dargestellt. Um den Abstand der Plots zum bestehenden Wald zu messen, wurde mit dem Tool «Messen» die kleinste mögliche Distanz zu dem bestehenden Wald gemessen. Bei dieser Methode ist mit einem Verlust an Genauigkeit zu rechnen, doch die erhobenen Werte geben einen guten ersten Überblick über die Distanzen.

3.3 Statistische Analyse

Das Microsoft-Programm Excel wurde verwendet, um die Daten so vorzubereiten, dass sie für statistische Analysen in das Programm R-Studio eingelesen werden konnten. Die bereinigten Daten wurden nach Variablen sortiert, um das anschliessende Codieren zu vereinfachen. Die Daten wurden anschliessend als Textdokument (txt) in R-Studio eingelesen. Mit dem Programm R-Studio wurden Graphiken erstellt und die Variablen auf Zusammenhänge untersucht. Dazu wurden unterschiedliche Variablen kombiniert, um anhand eines Balkendiagramms, eines Punkt- oder Liniendiagramms oder durch Box-Plots Trends zu visualisieren. Um die statistischen Zusammenhänge zu testen, wurde jeweils der Spearman-Rangkorrelationstest verwendet. Der Spearman-Test wurde gewählt, weil die Daten negativ auf Normalverteilung getestet wurden und ordinalskaliert sind. Der Korrelationskoeffizient ρ (rho) beschreibt den positiven oder negativen Zusammenhang. Die statistische Signifikanz wird durch das beidseitige Signifikanzniveau mit dem p-Wert < 0.5 bestätigt. Wenn in dieser Arbeit von statistisch signifikanten Resultaten gesprochen wird, bedeutet dies, dass der beobachtete Zusammenhang zu 95% wahrscheinlich ist. Die meisten Variablen wurden während der Analyse einzeln getestet, um so einen Überblick über die Aussagekraft der Graphiken zu erhalten. Zum Schluss der Berechnungen wurde eine Korrelationsmatrix erstellt, welche den rho-Wert der signifikant zusammenhängenden Variablen zeigt (Abbildung 24). Die Codes wurden in dem Programm R-Studio programmiert, bei deren Erstellung wurden auch Antworten von ChatGPT (OpenAI 4o) berücksichtigt.

Für die Verarbeitung der Klimadaten wurden fehlerhafte und fehlende Logger-Daten aus den Berechnungen ausgeschlossen³. Die Fehler wurden visuell identifiziert. Die Loggerdaten wurden bezüglich Start- und Endzeiten vereinheitlicht, um sicherzustellen, dass alle Plots gleich viele Loggerdaten umfassen. So umfassen die Mediane und Mittelwerte dieselben Monate und so können Ausreisser aufgrund von jahreszeitlichen Unterschieden ausgeschlossen werden. Die verwendeten Daten umfassen eine Zeitspanne vom 01.10.2023 bis 01.08.2024. Dies ist die einzige Zeitspanne, in welcher alle der ausgewählten Logger Daten gesammelt haben, denn nicht alle starten und enden zum selben Zeitpunkt. Dies zeigt eine erste Problematik, denn die Zeitspanne umfasst nicht das ganze Jahr und die Sommermonate sind somit unterrepräsentiert. Aus der Gesamtheit der Daten wurden einerseits die Minimal- und Maximalwerte, sowie die Mediane über die gesamte Zeitspanne für die Temperatur- und Luftfeuchtheitsdaten identifiziert. Zudem wurde sortiert nach Jahreszeiten jeweils der Mittelwert und der Median der kumulierten Monate zusammengefasst, kann die Saisonalität in die Berechnungen einfließen. Um die Klimadaten zu visualisieren, wurden unterschiedliche Methoden getestet. Die besten Ergebnisse wurden mit der Visualisierung der Mediane und Mittelwerte aller Daten durch Box-Plots erzielt, da diese die gesamte Breite der Daten widerspiegeln und dennoch einen Trend zeigen.

Mit Excel konnte die Anzahl der Arten pro Plot identifiziert werden. Auch mit Excel wurde eine Liste erstellt, welche pro Plot zeigt, ob *Pinus mugo Turra* oder *subsp. Uncinata* vorkommt oder nicht und wenn ja, wie viele Sämlinge sie enthalten. Um die Vegetation zu untersuchen, wurden Balkendiagramme und Punktdiagramme erstellt. Balkendiagramme zeigen die Anzahl der Arten oder Sämlinge in Zusammenhang mit den zu vergleichenden Variablen sehr deutlich. Punktdiagramme zeigen die Verteilungsmuster und somit auch Zusammenhänge zwischen physischer und vegetativer Umwelt. Die Vegetationsdaten wurden durch den Spearman-Test und Visualisierungen in Beziehung zu verschiedenen Klimavariablen, den Korngrößen, der Ablagerungsmächtigkeit, der Distanz zum Wald, der Hangneigung sowie der Höhenlage untersucht. Die Graphiken sind ein wichtiger Bestandteil der Analysen, weil hier Zusammenhänge sichtbar werden, welche nicht statistisch nachweisbar sind. Zudem zeigt sich auch die Art des Zusammenhangs deutlicher.

³ Dies betrifft 9 Logger: TL-11 (H160), TL-13 (C200), TL-14 (L200), TL-18 (H280), TL-21 (L240), TL-22 (C100), TL-23 (L100), TL-28 (C20), TL-29 (L20)

4 Ergebnisse

4.1 Datenanalyse

4.1.1 Auswertung Klimadaten

Es wurden verschiedene Möglichkeiten getestet, um nachvollziehbare Trends bezüglich den Klimadaten zu zeigen. Abbildung 11 und 12 zeigen den Trend der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit im Bereich der Murgangablagerung. Für die Temperaturdaten wurde der Mittelwert genommen, da so Fehler durch Mehrfachwiederholung in den Daten geglättet werden können. Um den Trend der Luftfeuchtigkeitsdaten zu zeigen, wurden die Medianwerte gewählt, um Fehler durch Ausreisser zu glätten. Die Wahl basiert auf optischer Einschätzung der Daten. Die Abbildungen bestätigen den erwarteten Temperaturverlauf der Jahreszeiten, wobei die sich Sommertemperaturen stark von Temperaturen der anderen Jahreszeiten abheben. Entsprechend der hohen Temperaturen ist auch die Feuchtigkeit im Sommer am niedrigsten. Bei der Interpretation der Abbildungen 11 und 12 ist Vorsicht geboten, da die Zeitreihe der Daten kein gesamtes Jahr umfasst und so die Monate August und September nicht repräsentiert werden.

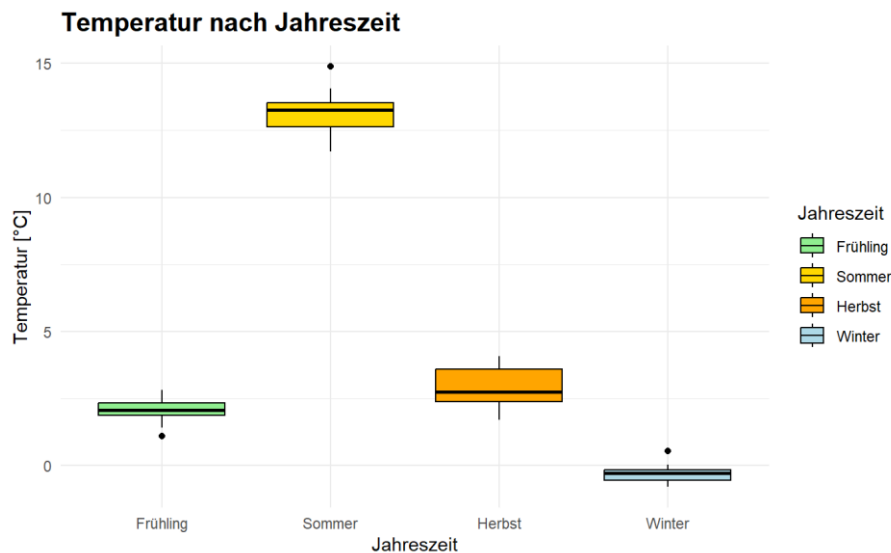


Abbildung 8 Boxplots der Temperaturwerte (°C) unterteilt nach Jahreszeiten

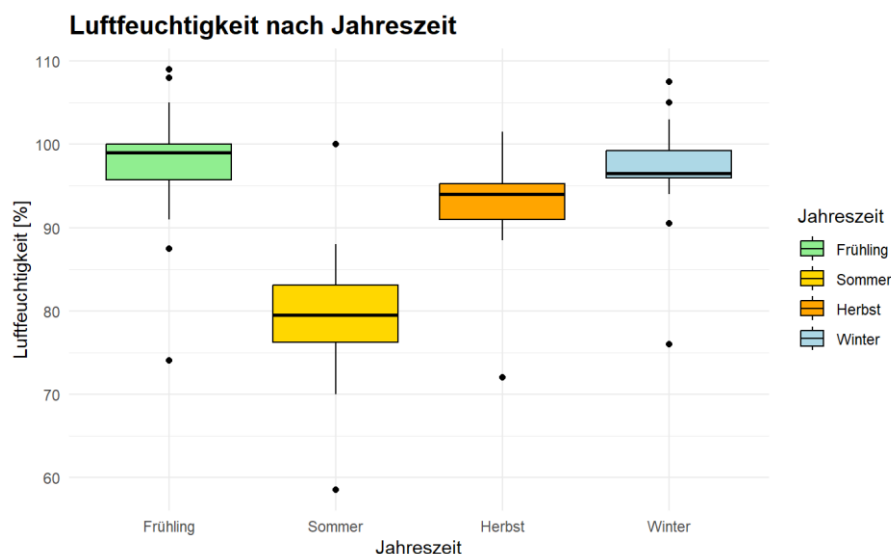


Abbildung 9 Boxplots der Luftfeuchtigkeitswerte (%) unterteilt nach Jahreszeiten

Die Klimadaten zeigen durch graphische Visualisierung keinen Trend, und der Spearman-Korrelationstest zeigt keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Temperatur und Höhe – weder bei den Extremwerten noch bei den Median- oder Mittelwerten oder den Medianwerten der Jahreszeiten. Da es sich auf der untersuchten Strecke um eine Zunahme von 300 Höhenmetern handelt, wäre normalerweise ein negativer Zusammenhang zwischen Höhe und Temperatur zu erwarten. Da die Fehlerhaftigkeit der Logger-Daten sehr gross erscheint, wurde auf weitere statistische Analysen verzichtet.

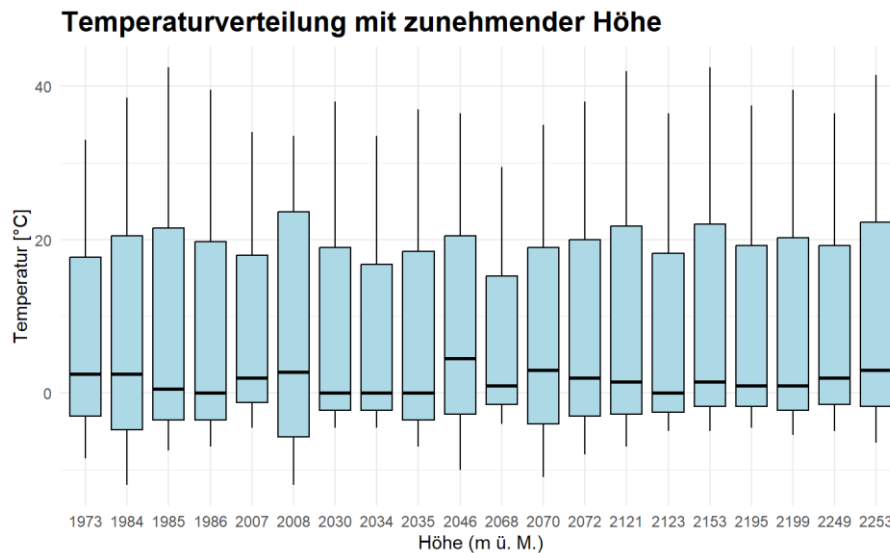


Abbildung 10 Darstellung der Temperaturverteilung mit zunehmender Höhe, Boxplot enthält minimale Werte, Quantil 16, Median, Quantil 84, maximale Werte

Die Resultate der Analyse der Luftfeuchtigkeitsdaten sind mit denen der Temperatur vergleichbar. Auch hier zeigen die Daten keinen Trend und der Spearman-Korrelationstest zeigt keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Luftfeuchtigkeit und Höhe, weder bei den Extremwerten noch bei den Median- oder den Mittelwerten.

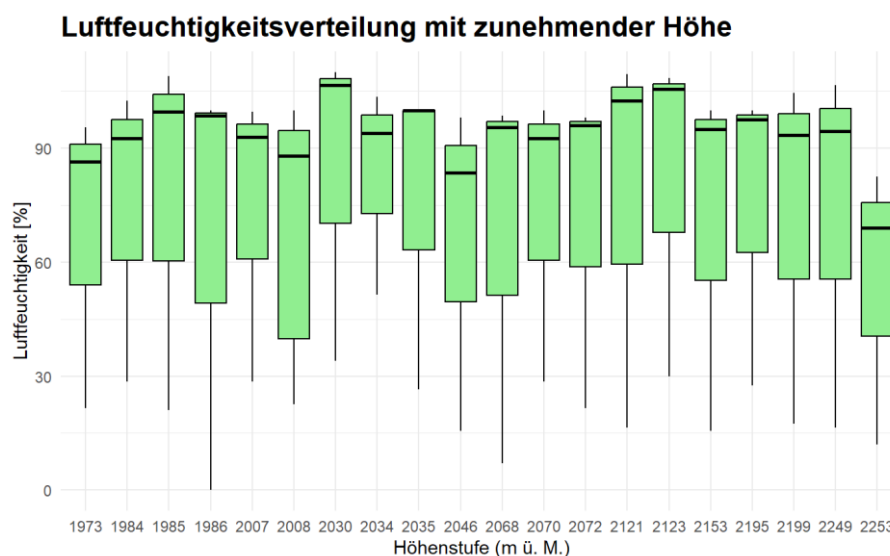


Abbildung 11 Darstellung der Luftfeuchtigkeitsverteilung mit zunehmender Höhe, Boxplot enthält minimale Werte, Quantil 16, Median, Quantil 84, maximale Werte

Um zu untersuchen, ob sich der Median der Temperaturen in den Ablagerungskategorien C, L und H unterscheidet, wurden die Daten nach Kategorie visualisiert. Die Graphen der Abbildung 15 zeigen einzeln keinen Trend. Der Mittelwert der Mediane zeigt jedoch, dass die Temperaturen in der Ablagerungskategorie H mit 1.89°C durchschnittlich am höchsten sind. Bei dieser Kategorie ist die Störung am grössten und die Vegetation am ärmsten. Im Vergleich dazu beträgt die Durchschnittstemperatur der Kategorie L 1.5°C und die der Kategorie C 1.43°C . Da die Zuverlässigkeit der Temperaturdaten durch zukünftige Projekte bestätigt oder verbessert werden muss, wird diese Annahme bei der Interpretation nicht besprochen.

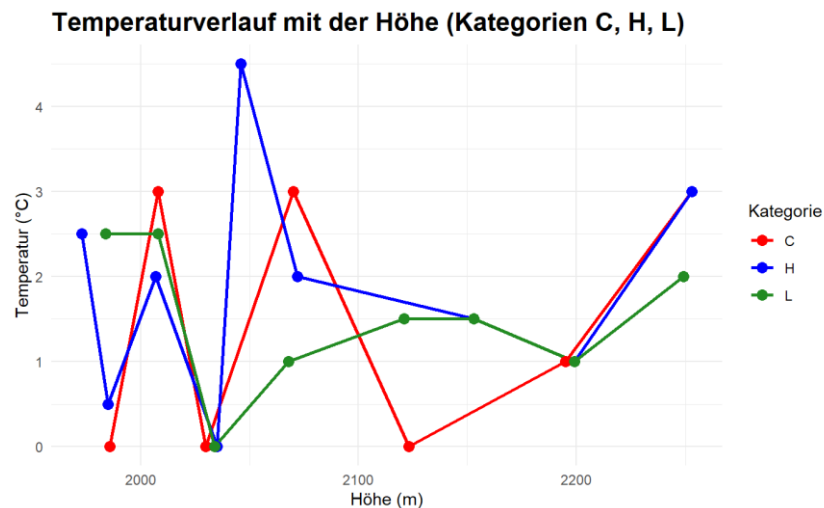


Abbildung 12 Temperaturverlauf mit zunehmender Höhe in Zusammenhang mit den Ablagerungskategorien, ermittelt aus den Median-Werten

Da die Resultate derselben Berechnungen mit der Variable Luftfeuchtigkeit keine relevanten Beobachtungen zulassen, wird auf weitere Analysen diesbezüglich verzichtet.

4.1.2 Verteilung der Artenvielfalt

Um zu zeigen, wie sich die Artenvielfalt in Zusammenhang mit der Höhe verhält, wurden die Anzahlen verschiedener Arten pro Plot ermittelt und geordnet nach Ablagerungskategorie entlang der Höhenstufen geordnet visualisiert. Abbildung 16 zeigt den Verlust von Vegetation durch das Murgangereignis. Während erwartungsgemäss die Kontrollflächen die höchsten Artenzahlen aufweisen, zeigt sich ein starker Artenverlust bei Ablagerungen, welche mehr als einen Meter mächtig sind (Kategorie C). Bei Ablagerungen, die weniger als 0.5m mächtig sind (Kategorie L), kommt es je nach Plot zu einer relativ hohen Artenzahl.

Die Durchführung eines Spearman-Korrelationstests ergab keinen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen Artenzahl und Höhe.

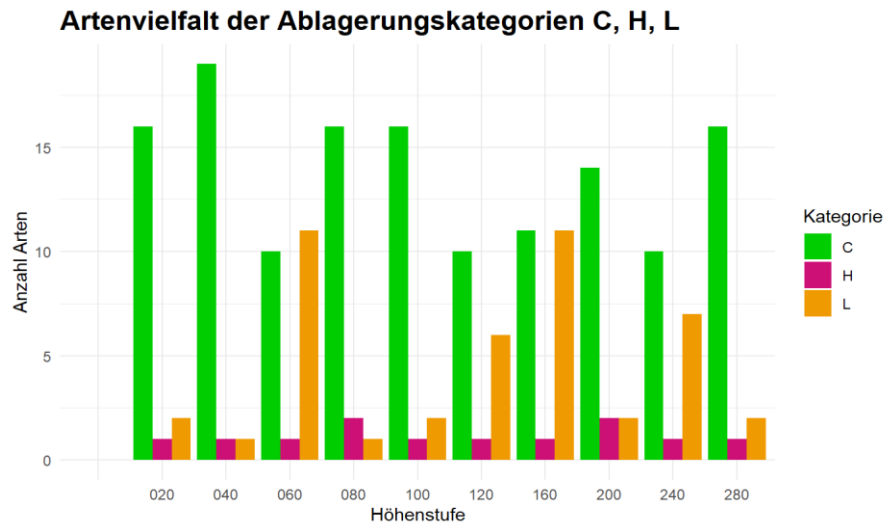


Abbildung 13 Visualisierung der Anzahl Arten pro Plot entlang der Höhenstufen. Höhenstufen gemessen in Meter, ab Strasse Buffalora. C = Kontrollfläche, H = hohe Ablagerung > 1m, L = niedrige Ablagerung < 0.5m

4.1.3 Verteilungsmuster *Pinus mugo Turra*

Um zu zeigen, wie sich das Vorkommen von *P. mugo Turra* verteilt, wurden zwei Graphiken erstellt. Abbildung 17 zeigt, ob die Art auf der untersuchten Höhenstufe vorkommt oder nicht. Diese Auswertung zeigt, dass *P. mugo Turra* vermehrt in den unteren Bereichen der Ablagerung vorkommt, wobei einige Exemplare auch in den höher gelegenen Plots vorkommen. Dass *P. mugo subsp. uncinata* nur selten auftritt verdeutlicht die Entscheidung, die Art nicht in die Berechnungen miteinzubeziehen.

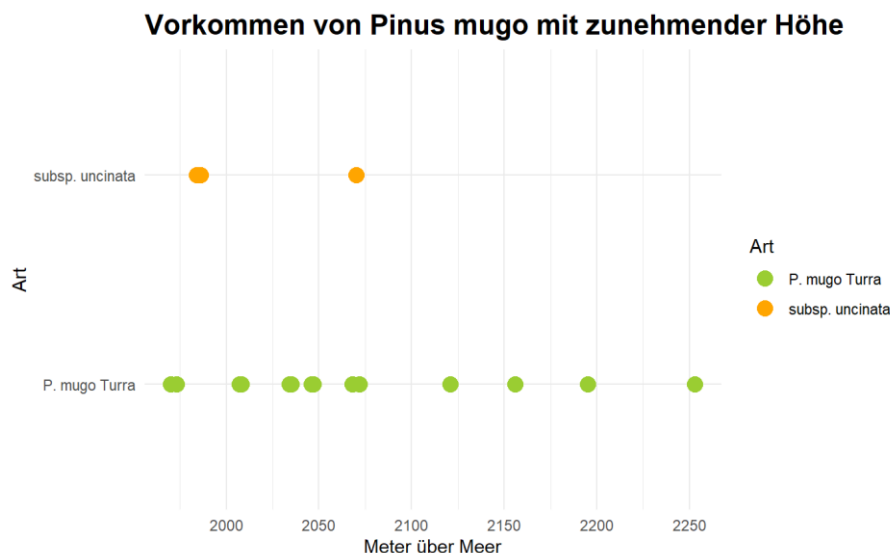


Abbildung 14 Während die Art *Pinus mugo subsp. uncinata* nur selten in unteren Ablagerungsbereichen beobachtet wurde, kommt *P. mugo Turra* entlang der gesamten Ablagerung vor

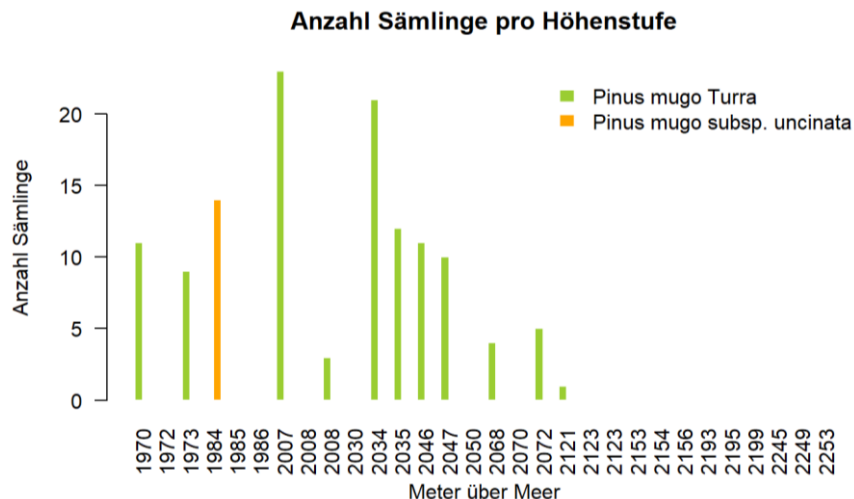


Abbildung 15 Die Verteilung der Anzahl Sämlinge von *Pinus mugo* entlang der Höhenstufen zeigt häufiges Vorkommen in unteren Bereichen der Ablagerung

Abbildung 18 zeigt die Verteilung der Sämlinge und deren Anzahl entlang der Höhenstufen. Hier wurde der Einzelstandort von *P. mugo subsp. Uncinata*-Sämlingen aufgeführt, um deren geringe Relevanz zu verdeutlichen.

Um zu untersuchen, ob Vegetationsmuster bei den Ablagerungskategorien C, H und L erkennbar sind, wurde durch Tabelle 1 aufgezeigt, wie oft *Pinus mugo Turra* im Vergleich zu anderen Arten auftritt. Auffällig ist das verhältnismässig hohe Vorkommen von *P mugo Turra* in der Kategorie H.

Tabelle 1 Anzahl der Arten pro Ablagerungskategorie im Vergleich zu der Anzahl *Pinus mugo Turra* Exemplare

Ablagerungskategorie	Anzahl Arten	Anzahl Auflistung <i>P. mugo Turra</i>	Anteil <i>P. mugo Turra</i> in %
H	12	5	41.7
L	45	6	13.3
C	138	6	2.9

4.1.4 Vegetationsanalyse in Zusammenhang mit der Ablagerung

Als Pionier-Art ist *P. mugo Turra* auf Extremstandorte spezialisiert. Die Ablagerung des Murgangs ist für die meisten Pflanzen aufgrund ihrer Mächtigkeit und der groben Korngrösse kein optimaler Standort. Unter der Annahme, dass sich die Verteilung der an Extremstandorte angepassten Pionier-Art *P. mugo Turra* von den anderen Arten unterscheidet, wurde der Zusammenhang untersucht.

Um zu zeigen, wie sich die Anzahl Sämlinge innerhalb der Ablagerungskategorien entlang der Höhenstufen verteilt, wurde Abbildung 19 erstellt. Das hohe Vorkommen von *P. mugo Turra* in der Ablagerungskategorie H ist ein Hinweis auf gute Etablierungschancen bei grossen Ablagerungsmächtigkeiten. Auf den Kontrollflächen wurden entweder absichtlich keine Sämlinge gezählt oder keine gesichtet.

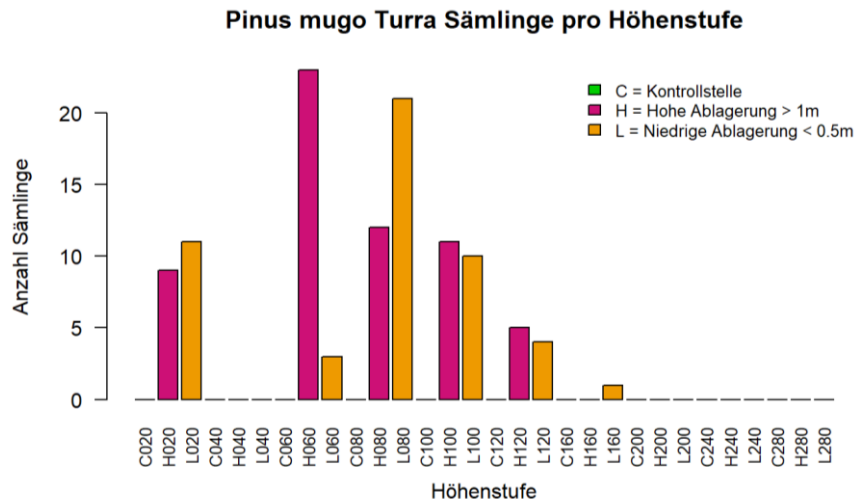


Abbildung 16 Anzahl der *Pinus mugo Turra* Sämlinge pro Höhenstufe, eingefärbt nach Ablagerungskategorie

Abbildung 19 zeigt die deutliche Dominanz der *Pinus mugo Turra*- Sämlinge in der Ablagerungskategorie H. Insgesamt wurden in der Ablagerungskategorie H 48 Sämlinge und in der Ablagerungskategorie L 29 Sämlinge gezählt und in den Kontrollflächen wurden keine gezählt.

Die statistische Analyse des Zusammenhangs zwischen der Anzahl der Arten und der Korngrösse zeigt einen signifikanten negativen Zusammenhang (Abbildung 20). Je kleiner die Korngrösse, desto höher ist die Anzahl der Arten. Der Zusammenhang kann für den Median und die beiden Quantile 16 und 84 gezeigt werden, die Extremwerte haben keinen signifikanten Einfluss.

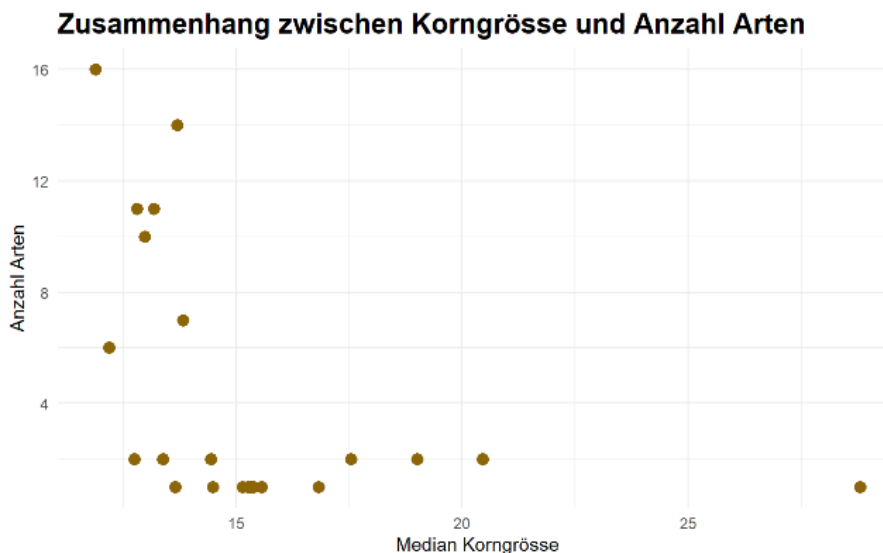


Abbildung 17 Zusammenhang zwischen dem Median der Korngrössen eines Plots und der Anzahl der darin beobachteten Arten

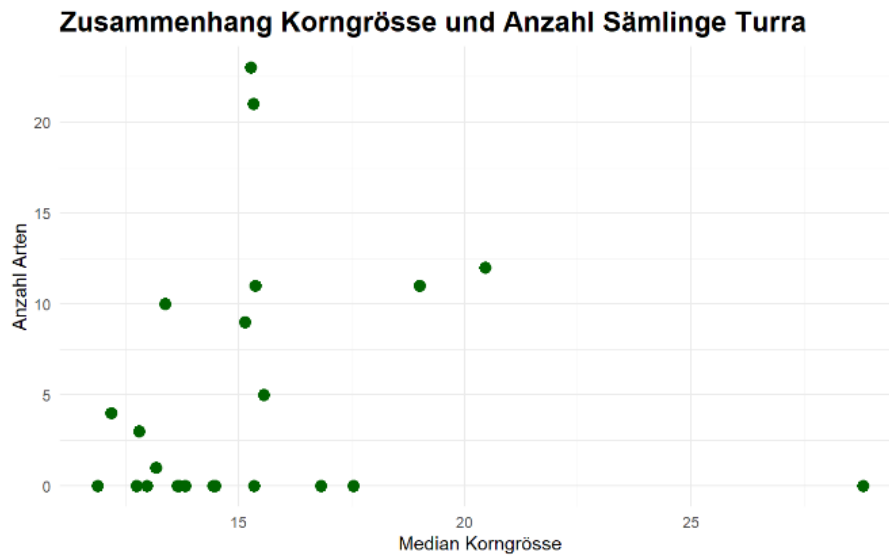


Abbildung 18 Zusammenhang zwischen dem Median der Korngrösse und der Anzahl der Sämlinge pro Plot

Die statistische Analyse des Zusammenhangs zwischen Anzahl Sämlinge von *Pinus mugo Turra* und der Korngrösse ergab keine statistisch signifikanten Resultate. Der Trend des Roh-Werts zeigt eine leichte positive Korrelation, es könnten somit tendenziell mehr Sämlinge im größeren Bereich der Korngrössen vorkommen (Abbildung 21).

Um ein Verteilungsmuster der Artenzahl zu identifizieren, wurden die Korngrössen in drei Kategorien eingeteilt: fein (< 13 mm), mittel (13–17 mm) und grob (> 17 mm). Die Kategorien wurden so gewählt, dass die Werte der Mediane der Korngrössen in drei ungefähr gleich grosse Teile eingeteilt sind.

Tabelle 2 Die Mittelwerte der Anzahl Arten und *P. mugo Turra*-Sämlinge, eingeteilt in drei Korngrössenklassen

Kategorie Korngrösse	Mittelwert Anzahl der Arten	Mittelwert Anzahl der Sämlinge
Fein < 13mm	9.0	1.4
Mittel 13-17mm	3.2	5.7
Grob 13-17mm	1.8	5.6

Tabelle 2 zeigt, dass die meisten Arten in feinen Korngrössen vorkommen, während im mittleren und groben Korngrössenbereich durchschnittlich die meisten Sämlinge von *P. mugo Turra* auftreten. Daraus kann geschlossen werden, dass die meisten Arten feineres Material bevorzugen, während Sämlinge von *Pinus mugo Turra* auch in größerem Material keimen können. Der Trend der Ablagerungskategorien wird durch Abbildung 22 durch Box-Plots visualisiert.

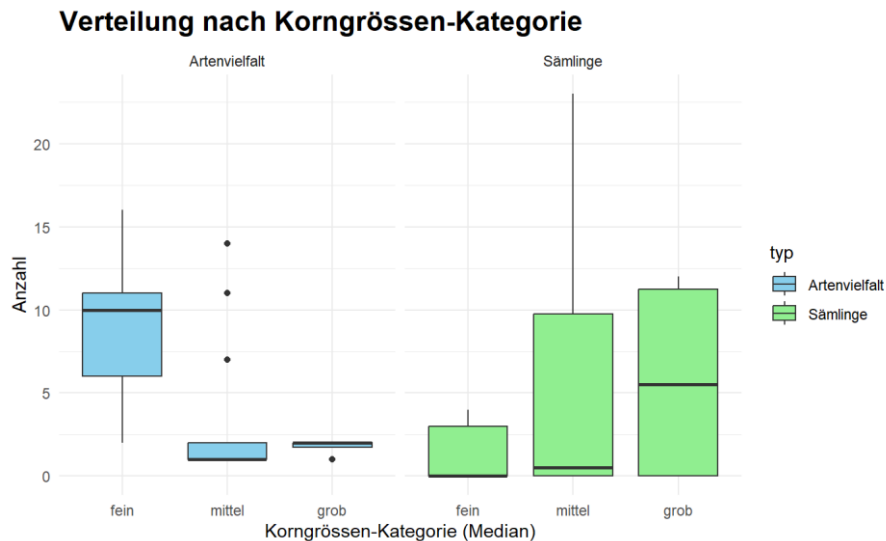


Abbildung 19 Die Boxplots visualisieren die Trends der Verteilung nach Korngrößenkategorie und zeigen den Unterschied zwischen der Anzahl der Arten und *Pinus mugo Turra*

4.1.5 Abstand der Vegetation zum Wald

Unter der Annahme, dass sich die Vegetation in der Nähe der bestehenden Vegetation wieder etabliert, wurde der Abstand der Plots zu dem intakten Wald gemessen. Dazu wurde auf QGIS der kleinste Abstand der H- und L-Plots zum Wald gemessen. Die gemessenen Distanzen sind keine genauen Messungen, da der bestehende Wald auf dem Orthofoto der Ablagerung abgeschätzt wurde. Sie bewegen sich in einer Größenordnung zwischen 1m und 60m, wurden gerundet und können einen ersten Eindruck vermitteln, ob der Abstand einen möglichen Einfluss auf die Verteilung hat. Die Ergebnisse sind eindeutig. Der statistisch signifikant positive Zusammenhang zwischen der Anzahl der Arten und der Distanz zeigt, dass die meisten Arten in der Nähe des Waldes vorkommen. Statistisch signifikant ist auch die negative Beziehung zwischen den *P. mugo Turra*-Sämlingen und der Distanz. Abbildung 23 zeigt diesen Trend deutlich: Die meisten Arten kommen in 10m Waldnähe vor. Die Verteilung der *P. mugo Turra*-Sämlinge ist variabler, kommen vermehrt in einem Abstand zwischen 10m und 30m vor (Abbildung 24).

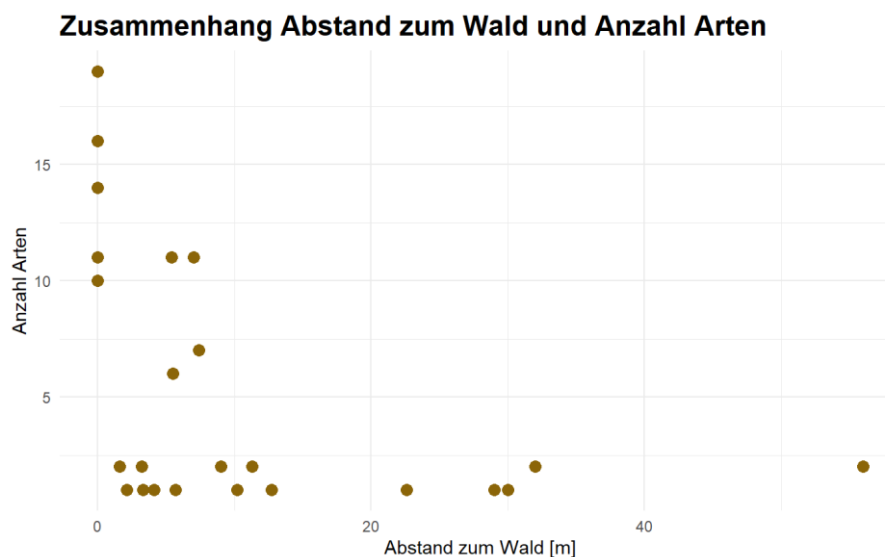


Abbildung 20 Zusammenhang zwischen dem Abstand der Plots zum Wald und der Anzahl der Arten

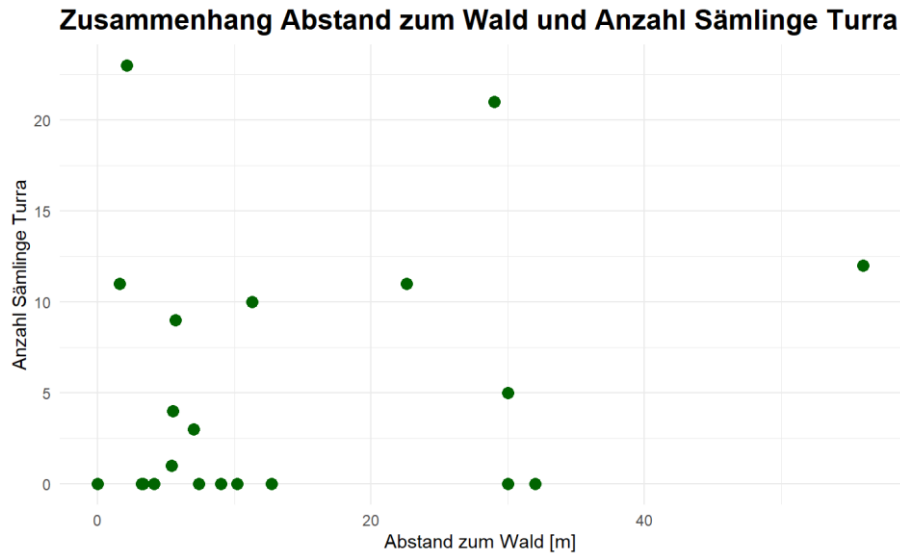


Abbildung 21 Zusammenhang zwischen dem Abstand der Plots zum Wald und der Anzahl der Sämlinge von *P. mugo Turra*

4.1.6 Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Vegetation

Statistisch signifikant ist der negative Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Anzahl *P. mugo Turra*- Sämlinge. Abbildung 25 zeigt sehr deutlich, dass bei einer Hangneigung von über 25° keine Sämlinge mehr vorkommen. Zwischen der Hangneigung und der Anzahl der Arten konnte kein statistischer Zusammenhang bestätigt werden, die Abbildung 26 zeigt jedoch, dass die meisten Arten im Bereich der mittleren Hangneigung von ungefähr 20° vorkommen.

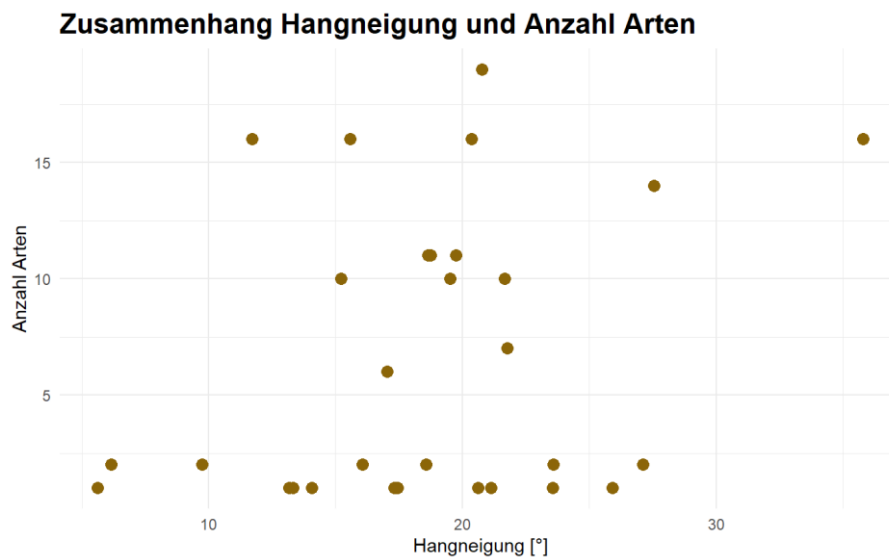


Abbildung 22 Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Anzahl der Arten

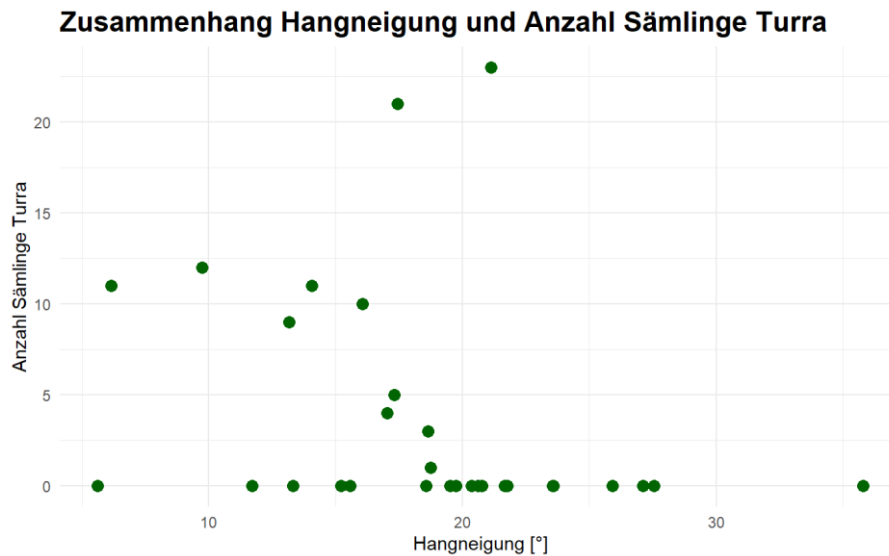


Abbildung 23 Zusammenhang zwischen der Hangneigung und der Anzahl Sämlinge von *Pinus mugo Turra*

4.1.7 Prüfung weiterer Variablen

Für die Prüfung der Variablen wurden weitere Graphiken erstellt und betrachtet und weitere statistische Tests durchgeführt. Diese werden in diesem Kapitel nicht weiter besprochen, da sie keine erwähnenswerten Resultate zeigen und somit für die Interpretation nicht relevant sind. Um viele Variablen gleichzeitig zu untersuchen, wurde Abbildung 27 erstellt. Sie zeigt, dass von den vielen getesteten Variablen nur wenige einen statistisch signifikanten Zusammenhang aufweisen. Dies verdeutlicht einerseits die Limite der statistischen Untersuchungen, andererseits mögliche Fehler in den Daten. Die Ergebnisse der Klimadatenanalyse bestätigen diese Annahme.

4.2 Übersicht Ergebnisse

Um den Zusammenhang zwischen Variablen zu untersuchen, wurden sie mit dem Spearman-Korrelationstest untersucht. Abbildung 27 zeigt eine Übersicht über alle getesteten Variablen. Die gelb umrandeten Ergebnisse werden als relevant betrachtet, die anderen bestätigen eine Beziehung zwischen nicht relevanten Variablen. Nicht relevant für die vorliegende Arbeit ist beispielsweise die Beziehung zwischen den Korngrößenkategorien oder zwischen der physischen Umwelt und den Klimadaten, da diese Untersuchungen mehrheitlich von Kolb (2025) abgedeckt werden. Die Korrelationsmatrix bestätigt den statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen *P. mugo Turra* und der Höhe über Meer, der Hangneigung, dem Abstand zum Wald und der Anzahl der Arten. Somit bestätigt die statistische Untersuchung die Relevanz des Untersuchungsgegenstandes. Das bedeutet, dass *P. mugo Turra* auch für weitere Untersuchungen relevant bleibt. Auch die negative Beziehung zwischen der Korngröße und der Anzahl der Arten bestätigt den Zusammenhang zwischen physischer und belebter Umwelt. Die Zusammenhänge zu den Ablagerungsmächtigkeiten wurden nicht statistisch untersucht, da diese in zwei Kategorien eingeteilt wurden (>0,5m und <1m) und damit nicht für diese Berechnungen geeignet sind.

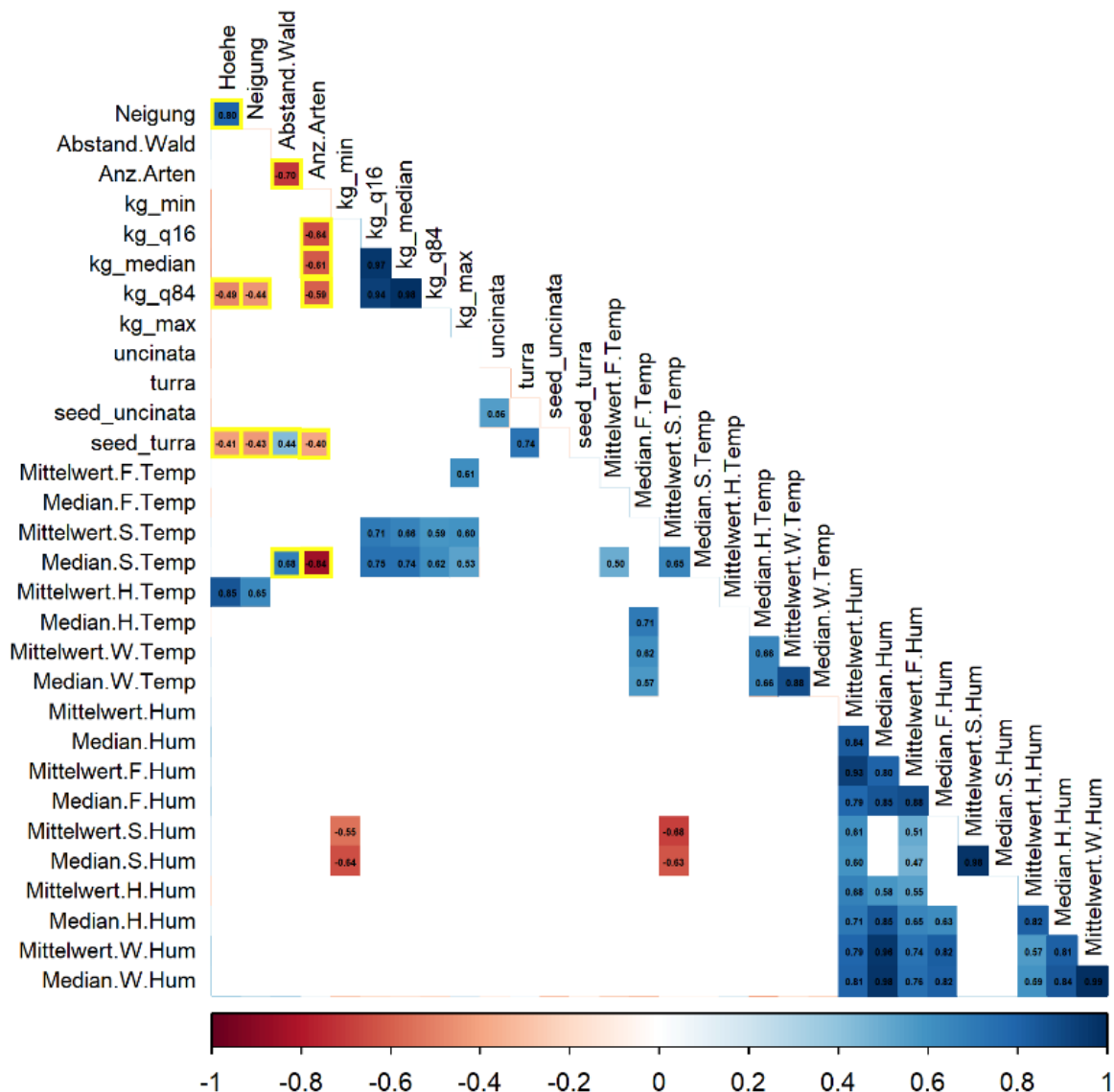


Abbildung 24 Eine Korrelationsmatrix zeigt statistisch signifikante Werte des Spearman-Rangkorrelationstests

Insgesamt ist die Analyse erst eine erste Einschätzung der Situation und möglicher Entwicklungen. Die Daten basieren auf einer einzigen Vegetationsaufnahme und zeigen so nicht die gleiche Dimension wie eine mehrjährige Datenerfassung. Umfassendere Daten ermöglichen auch statistisch signifikantere Aussagen.

Diese ersten Erkenntnisse zeigen den Zusammenhang zwischen der physischen Umwelt (Korngrösse und Ablagerungsmächtigkeit) und der belebten Umwelt (Vegetation) bestätigt werden. Die grösste Artenvielfalt auf der Murgangablagerung wird bei feiner Korngrösse und niedriger Ablagerungsmächtigkeit festgestellt. Durch die Anpasstheit an Extremstandorte besetzt *P. mugo* Turra konkurrenzarmer Standorte mit oft höherer Ablagerung und größeren Korngrößen.

5 Diskussion

5.1 Interpretation der Ergebnisse

5.1.1 Auswertung der Klimadaten

Bei der Auswertung der Klimadaten wurde getestet, ob gemäss Annahme die Temperatur und Luftfeuchtigkeit mit der Höhe korrelieren. Dies sollte als Basis dienen, Vegetationsdaten mit diesen Variablen zu testen. Dazu wurden der Median und die Extremwerte einerseits durch Box-Plots dargestellt, andererseits mit dem Spearman-Korrelationstest getestet. Die Resultate zeigen weder die erwartete Temperaturabnahme mit der Höhe noch andere deutliche Muster und auch keine statistisch signifikanten Zusammenhänge. Um Fehler zu vermeiden, wurden die Daten von 9 offensichtlich fehlerhaften Loggern aus den Berechnungen ausgeschlossen. Fehlerhafte Logger wurden einerseits bereits im Report zu der Feldarbeit notiert, andere wurden später bei der Datenanalyse durch visuelle Kontrolle identifiziert. Die Daten von einigen Loggern zeigten nicht nachvollziehbare Werte an, welche zum Ausschluss führten. Beispielsweise wurde für einige Logger während mehrerer Tage immer die gleiche Temperatur notiert, bei anderen Loggern wurden unerklärlich grosse Temperatur-/Luftfeuchtigkeitssprünge aufgezeichnet. Dass 11 von 31 Logger aussortiert werden mussten, spricht für die Anfälligkeit der Geräte auf Fehler. Es verblieben 20 Logger mit identischen Datenreihen, von Oktober 2023 bis August 2024. Dass die Auswertung der überprüften und vereinheitlichten Daten keine Trends oder statistische Zusammenhänge zeigt, kann ein Hinweis auf weitere unerkannte Fehler in den Datenstrukturen sein. Da die Resultate der Klimadaten keine Relevanten Beobachtungen zulassen, wurde auf weitere Analysen verzichtet. Auch eine Interpretation der Ergebnisse würde zu keinem nachvollziehbaren Ergebnis führen.

Mathematisch konnte mit dem Mittelwert der Mediane gezeigt werden, dass die Durchschnittstemperatur bei der Ablagerungskategorie H mit 1.89°C am höchsten ist. Die höhere Temperatur könnte durch die fehlende Vegetationsdecke entstehen, wenn die Sonneneinstrahlung auf die dunkleren Felsen trifft. Es ist jedoch zu beachten, dass die Berechnung stark verallgemeinert, da sie den Mittelwert aus den Median-Werten zieht, welche ihrerseits bereits eine vereinfachte Abbildung der Wirklichkeit sind. Die Visualisierung durch Abbildung 15 bestätigt den Trend nicht. Auf weitere Interpretationen der Ergebnisse wird verzichtet.

5.1.2 Verteilung der Artenvielfalt

Luftaufnahmen zeigen deutlich, dass durch den Murgang grosse Vegetationsflächen überschüttet und transportiert wurden. Auch die Analyse der Verteilung der Arten zeigt deutlich, dass gegenüber den Kontrollflächen C, welche nicht vom Ereignis betroffen sind, die Artenvielfalt stark abgenommen hat. Während die stark betroffenen Flächen H mit mächtiger Ablagerung über einem Meter kaum Arten aufweisen, weisen die Plots der Ablagerungskategorie L (niedrige Ablagerung unter einem Meter) relativ hohe Artenzahlen auf. Dies kann ein Hinweis auf überlebendes Pflanzenmaterial sein, welches sich vegetativ wieder etablieren konnte. Gemäss Pabst und Spies (2001) gilt die intakte Vegetation als wichtiger Faktor, welche die Vegetationsentwicklung nach einem Ereignis beeinflussen kann. Überlebende Pflanzenmaterial, vegetativ oder als Samen erleichtert die Wiederbesiedlung.

Der statistische Zusammenhang zwischen der Höhe und der Anzahl der Arten konnte nicht bestätigt werden. Unter der Annahme, dass sich die Vegetation mit der Höhe verändert, würde hier eine Veränderung erwartet werden. Das Resultat ist jedoch nicht überraschend, denn alle Plots liegen unterhalb der Baumgrenze und die gesamte Ablagerung liegt im selben

Vegetationstyp. In dieser Region dominiert der Föhrenwald (Bezzola, 2023), und innerhalb relevanter Nähe ändert die Vegetation nicht gross, somit entsprechen die Resultate des Korrelationstestes den Erwartungen.

5.1.3 Verteilung von *Pinus mugo Turra*

Pinus mugo Turra tritt im gesamten Ablagerungsbereich auf, vermehrt jedoch in den unteren Bereichen der Ablagerung. Auch die Sämlinge von *P. mugo Turra* wurden vermehrt in unteren und mittleren Höhenlagen beobachtet. Deutlich sichtbar ist, dass die Sämlinge der Art im unteren Bereich häufig auftreten und über 2121m.ü.M. keine Sämlinge mehr beobachtet werden. Dies könnte mit dem Transport des Schuttmaterials nach unten zusammenhängen, denn ein Murgang transportiert auch Samen und andere Pflanzenbestandteile, welche sich nach dem Ereignis wieder etablieren können (Pabst und Spies, 2001). Um zu untersuchen, welche Faktoren das Verteilungsmuster der Art beeinflussen könnte, wurden die Vegetationsdaten bezüglich Klimas, Ablagerungsmächtigkeit, Korngrösse, Distanz zum Wald und Hangneigung untersucht. Auf eine Interpretation der Ergebnisse in Bezug auf die Forschungsliteratur wurde aufgrund zu wenigen Ergebnissen verzichtet.

5.1.4 Einfluss der Ablagerungsmächtigkeit

Es kann gezeigt werden, dass besonders in mächtigen Ablagerungen die Art *Pinus mugo Turra* in einem sehr hohen Verhältnis vorkommt. Die Analyse bestätigt, dass sich auch die Sämlinge gut in den mächtigen Ablagerungen etablieren konnten. Anhand der Daten kann bestätigt werden, dass die Anzahl der Sämlinge verhältnismässig hoch ist. Dies deutet auf gute Etablierungs- oder Überlebenschancen sowie auf Konkurrenzvorteile der Art in hohen Ablagerungen hin. Angepasst an Extremstandorte mit felsigem Untergrund und geringer Wasserverfügbarkeit kann die Art hier gut überleben. Weil die Bäume der Umgebung weggerissen wurden, ist auch ihr hohes Bedürfnis nach Licht gedeckt. *Pinus mugo Turra* kann der rauen Umgebung trotzen und sich hier als Pionierpflanze etablieren (Bezzola, 2023). Durch solche Erstbesiedlungen beginnt sich auch das lokale Ökosystem zu erholen, da durch die neue Vegetation Mikrohabitate und Mikroklima entstehen können ((Wohlgemuth et al., 2019).

Die durch die Analyse gewonnenen Erkenntnisse zeigen, dass die Unterschiede der Ablagerungsmächtigkeiten eine wichtige Rolle für die Sukzession spielen. Während bei niedrigen Ablagerungen L verhältnismässig viele verschiedene Arten keimen oder überleben, werden mächtigere Ablagerungen von der stark angepassten Art *P. mugo Turra* wiederbesiedelt. So zeigen die Ergebnisse, dass mächtige Ablagerungen in den ersten Jahren nach der Ablagerung nicht besonders artenreich sind, jedoch auch nicht vegetationsfrei. Es zeigt sich auch ein wechselseitiges Zusammenspiel zwischen der Ablagerungskategorie und der Art: Einerseits ist *Pinus mugo Turra* wichtig für die Wiederbesiedlung der Ablagerung, andererseits profitiert die Art von den Gegebenheiten der Ablagerung, da sie hier dem Konkurrenzdruck ausweichen kann. Diese Sukzession bietet möglicherweise die Grundlage für die erfolgreiche Erholung beziehungsweise das Fortbestehen des lokalen Ökosystems.

5.1.5 Einfluss der Substrat-Korngrösse

Nun stellt sich die Frage, ob sich das Verteilungsmuster auch in Bezug auf die Korngrösse zeigt, denn die Studie von Yousefi und Imaizumi (2024) zeigt, dass sich die Vegetation bei feinen Korngrössen schneller erholt. Die Analyse bestätigt einen signifikant negativen Zusammenhang zwischen der Korngrösse und der Anzahl Arten. Je kleiner die Korngrössen in den

Plots, desto mehr verschiedene Arten wurden gezählt. Dass die Extremwerte keinen signifikanten Einfluss haben, bedeutet, dass einzelne besonders grosse oder kleine Gesteinsstücke keinen Einfluss auf die Anzahl der Arten haben. Diese Ergebnisse zeigen deutlich, dass die meisten Arten feines Material bevorzugen und sich hier trotz Konkurrenzdruck erfolgreich etablieren können. Dieses Ergebnis ist nicht erstaunlich, denn aufgrund der kleineren Zwischenräume kann feines Material besser Wasser und Nährstoffe halten und speichern. Der selbe Test in Bezug auf die Anzahl Sämlinge von *P. mugo Turra* zeigt kein statistisch signifikantes Resultat, jedoch ist der Rho-Wert leicht positiv, somit hat es tendenziell mehr Sämlinge bei grösseren Korngrössen. Um die Verteilung der Sämlinge entlang der Korngrössen zu testen, wurden die Korngrössen gemäss der Median-Werte in drei gleich grosse Kategorien (fein < 13mm, mittel 13-17mm, grob > 17mm) eingeteilt. Diese Darstellung zeigt deutlich, dass die grösste Anzahl Arten in den feinkörnigen Ablagerungen wächst und der Grossteil der *P. mugo Turra*-Sämlinge in mittel- bis groben Ablagerungen gezählt wurde.

5.1.6 Distanz zum Wald

Während die grösste Artenvielfalt in Waldnähe beobachtet wird, kommen die *P. mugo Turra*-Sämlinge vergleichsweise in grösserer Distanz vor. Dies bestätigt die Annahme, dass die meisten Pflanzen in gewisser Nähe zu der bestehenden Vegetation keimen. Viele Pflanzen sind auf eine Verbreitung der Samen durch Tiere wie Ameisen angewiesen und können so nur geringe Distanzen zurücklegen. Die Samen von *Pinus mugo Turra* werden durch den Wind verbreitet (Schweizerischer Nationalpark a, o. D.) und können so grössere Distanzen überwinden als viele andere Arten. Dieses Ergebnis in Zusammenhang mit den Resultaten der Untersuchungen bezüglich Korngrösse und Ablagerungsmächtigkeit verweist wieder auf die Nischendifferenzierung der Art. Die Windverbreitung ermöglicht es der Art, sich ausserhalb der konkurrenzstarken Gebiete in Waldnähe zu etablieren.

5.1.7 Einfluss der Hangneigung

Weniger deutlich sind die Untersuchungen bezüglich Hangneigung. Zwar kann gezeigt werden, dass die Artenvielfalt ab 25° stark abnimmt, doch ein Zusammenhang konnte nicht bestätigt werden. Die Untersuchungen zeigen, dass die meisten *P. mugo Turra*-Sämlinge in weniger steilen Bereichen bis 20° vorkommen. Auf eine Interpretation dieser Ergebnisse wird verzichtet, da hierzu keine wissenschaftliche Lektüre gefunden wurde und die Ursachen von vielen, noch zu testenden, Variablen abhängen könnten.

5.1.8 Übersicht der Ergebnisse

Damit wird deutlich, dass *Pinus mugo Turra* ein Jahr nach dem Murgangereignis die Stellen der Ablagerung mit hoher Ablagerungsmächtigkeit und mittleren bis groben Korngrössen dominiert. Im Gegensatz dazu wurde die grösste Artenvielfalt in Bereichen mit geringer Ablagerungsmächtigkeit und feinen Korngrössen notiert. Somit unterstreicht die Analyse der Korngrösse die Interpretation in Bezug auf die Ablagerungsmächtigkeit. Dass sich *P. mugo Turra* im Gegensatz zu den meisten anderen Arten in grösserer Distanz zu dem intakten Wald etablieren kann, verweist auf die Nischendifferenzierung der Art. Dass diese an Extremstandorte angepasste Art die Wälder in der Region dominiert, ist nicht erstaunlich (Bezzola, 2023).

Bei der Interpretation darf nicht vergessen werden, dass es sich bei der Analyse um eine Momentaufnahme handelt. Es wird lediglich der Zustand nach einem Jahr untersucht und keine Veränderungen über die Zeit werden miteinbezogen. Es stellt sich die Frage, ob die *Pinus*

mugo Turra-Sämlinge, welche anscheinend in größerem Material gut keimen können, sich auch längerfristig etablieren können.

Trotz der fehlenden Aussagekraft der Klimadaten ermöglichte die Analyse der vorhandenen Daten einige grundlegende Erkenntnisse. Unterschiede in der physischen Gestalt der Ablagerung eines Murgangs spiegeln sich in der Vegetationsdynamik. Die Ablagerungsformen und Korngrößen eines Murgangs variieren nicht nur zwischen den Ereignissen und Standorten stark, sondern auch innerhalb einer einzelnen Ablagerung unterscheiden sich Korngröße und Mächtigkeit stark. Aufgrund der Dynamik eines Murgangs wirken am Kopf- und Schwanzbereich nicht dieselben Kräfte und damit wird auch nicht dasselbe Gefüge abgelagert. Auch im Querprofil unterscheiden sich die Ablagerungsformen, beispielsweise aufgrund seitlichen Wasseraustritts (Schlunegger et al., 2023). Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass diese hohe Diversität der Murgangablagerung sich positiv auf die Vielfalt der Vegetationsmuster auswirkt.

5.2 Mögliche Fehler

Wie bereits erwähnt, können Fehler innerhalb der Datenstruktur zu Fehlern bei der Analyse führen. Durch die Natur der computerbasierten Berechnung können zwar direkte Berechnungsfehler weitgehend ausgeschlossen werden. Programmierungsfehler und Fehler beim Codieren durch den Menschen, welche zu indirekten Berechnungsfehlern führen, können nicht ausgeschlossen werden. Falls die Daten ungenügend vorbereitet werden, kann es sein, dass fehlende, doppelte oder falsche Werte in die Berechnungen einfließen. Falls das Resultat nicht stark von den erwarteten Werten abweicht, wird der Trend falsch interpretiert. Da Syntaxfehler nicht immer zu einer Fehlermeldung führen, können kann der Befehl trotz falschen Zuweisungen ausgeführt werden. Aus diesem Grund sind die Resultate zu überprüfen, falls sie jedoch geringfügig von den Erwartungen abweichen, ist auch hier ein Erkennen der Fehler schwierig. Ein häufiger Fehler ist die Verwechslung der zu verwendenden Variablen. Bei Graphiken kann die Plausibilität leichter überprüft werden, bei statistischen Tests müssen fragwürdige Resultate wiederholt werden.

Auch der Umgang mit RStudio muss in den Kontext der Fähigkeiten gesetzt werden. Aufgrund des begrenzten Rahmens der Arbeit wurde zwar ein bestmöglicher Umgang mit dem Programm angestrebt, doch fehlende Kenntnisse beeinflussen die Resultate. Zudem fordert das Programm statistische Kenntnisse. Grundsätzlich kann die Verwendung von RStudio kritisch hinterfragt werden, da einige der Berechnungen und viele der Visualisierungen auch mit Excel hätten erstellt werden können. Der Umgang mit Excel erfordert aufgrund der benutzerfreundlichen Oberfläche zwar kurzfristig weniger Kenntnisse beim Codieren, doch aufgrund der Natur des Programms sind die ausgeführten Schritte weniger nachvollziehbar. Somit eignet sich Excel gut für die erste Verarbeitung der Daten, für weiterführende Berechnungen sind andere Anwendungen passender. Bei RStudio werden die auszuführenden Schritte einzeln programmiert, dadurch sind sie transparenter. Grundsätzlich eignet sich das Programm gut für gewünschte Analyse im Rahmen dieser Arbeit. Weil es eine integrierte Entwicklungsumgebung für die Programmiersprache R ist, ist die Code-Entwicklung komfortabler. Es ist öffentlich zugänglich und durch Packages können vorprogrammierte Inhalte heruntergeladen werden, welche beispielsweise die Visualisierung erleichtert.

Auch bei der Interpretation der Ergebnisse können Fehler entstehen. Aufgrund der Ausgangslage bezüglich Forschungsliteratur fehlen vergleichbare Analysen und Situationen. Insofern

allgemeingültige Aussagen sind schwer zu begründen, aber auch direkte Vergleiche mit ähnlichen Forschungsprojekten sind mit Vorsicht zu treffen, da die Ausgangslagen sich stark unterscheiden. Da die vorhandenen Vegetationsdaten der vorliegenden Arbeit eine Einzelsituation abbilden und so die zeitliche Komponente nicht miteinbeziehen, bleiben Interpretationen diesbezüglich vage und müssen durch weiterführende Forschung bestätigt werden. Eine weitere Fehlerquelle ist die fehlende Kenntnis über das Forschungsprojekt. Für diese Arbeit wurden bereits erhobene Daten verwendet. Zwar fand im Gespräch mit dem Mitarbeiter Geoinformation Christian Rossi eine Einführung in das Forschungsprojekt statt, doch eine Interpretation der verfügbaren Daten ohne detaillierte Projektkenntnisse kann zu Fehler führen.

5.3 Wissenschaftlicher Kontext

Die untersuchte Vegetationsentwicklung auf einer Murgangablagerung von Pabst und Spies (2001) liegt in Oregon Coast Range. Im Gegensatz zu dem Standort von Buffalora liegt das Untersuchungsgebiet ungefähr auf 500m.ü.M. und in Küstennähe und hat folglich eine unvergleichbare Vegetationszusammensetzung. Auch beinhaltet das Forschungsprojekt die Entwicklungsdynamik während 10 Jahren. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der Haupttreiber der Vegetationsmuster die Substratvariabilität ist. Das Substrat wurde jedoch weniger auf Korngrösse, sondern vielmehr auf die Anteile organischen Materials untersucht. Unterschieden wurde mineralischem Boden, Felsigem Untergrund und holzige Ablagerungen. Somit ist ein Vergleich der Resultate mit denen der vorliegenden Arbeit nicht zielführend, da sich die Variablen zu stark unterscheiden.

Ähnliche Ergebnisse zeigten auch die Studie von Yousefi und Imaizumi (2024). Auch hier wurden die Vegetation und die Sedimentdynamik untersucht. Im Gegensatz zu dem alpinen Standort des Murgang Buffaloras liegt das Untersuchungsgebiet jedoch in einem grossflächigen Erdrutsch Ohya in Zentraljapan. Das Untersuchungsgebiet umfasst je nach Standort Ablagerungen von unterschiedlich vielen Murgangereignissen aus den letzten 5 Jahren. Im Vergleich dazu beinhaltet das Untersuchungsgebiet Buffalora die Ablagerung eines einzelnen Murgangereignisses. Aus diesem Grund und weil sich die Gesteine (In Ohya paläogener Sandstein und stark zerklüfteter Schiefer) und die Vegetation der beiden Gebiete stark unterscheiden, ist beim Vergleich Vorsicht geboten. Auch diese Studie bestätigt den Zusammenhang zwischen Korngrösse und Vegetationserholung, zeigt jedoch, dass die Erholung bei feinen Korngrössen schneller ist (Yousefi und Imaizumi, 2024). Dies entspricht nicht ganz den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit, da hier die Wiederbesiedlung der mächtigen Ablagerungen durch *Pinus mugo* Turra stark gefördert wird.

Bei der Vorher-Nachher-Studie von Forster et al. (2020) wurde ein aquatisches Flusssystem im Westen Washingtons USA untersucht, welches durch einen Murgang gestört wurde. Die Ausgangslage unterscheidet sich vom Murgang Buffalora dadurch, dass die Murgänge entlang von bestehenden Fließgewässern verliefen. Während in Buffalora hauptsächlich der bestehende Wald betroffen ist, werden hier die Flussbetten und das Flussökosystem verändert. Die Studie bestätigt eine rasche Wiederbesiedlung durch Pionierarten, doch da sich die Vegetation stark von der alpinen unterscheidet, ist der Vergleich nicht aussagekräftig.

Somit spiegeln die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit die Erkenntnisse aus bisherigen themenverwandten Studien. Trotz unterschiedlicher Ausgangslage wird ein Zusammenhang zwischen dem Substrat und der Vegetationsdynamik gezeigt.

5.4 Beantwortung der Forschungsfragen

Ein Jahr nach dem Ereignis kann der Beginn der Vegetationssukzession auf der Ablagerung beobachtet werden. Während die meisten Arten in geringeren Ablagerungsmächtigkeiten und bei feinen Korngrößen überlebt haben oder gekeimt sind, etabliert sich die Art *Pinus mugo Turra* vorwiegend bei vergleichsweise mächtigeren Ablagerungen und gröberen Korngrößen. Zusammenhänge zwischen den Korngrößen und dem Vorkommen von *P. mugo Turra* können bestätigt werden. Auch zeigen, dass die Ablagerungsmächtigkeit die Verteilung der Vegetation beeinflusst. Somit konnten die ersten Forschungsfragen sehr deutlich beantwortet werden. Die vierte Frage nach positiven Auswirkungen auf die Vegetation durch Störungen bleibt offen, weil langfristige Erkenntnisse fehlen. Vorerst wirkt die Wiederbesiedlung erfolgreich, besonders durch die verschiedenen Vegetationsmuster. Zwar ist die Artenvielfalt in den Kontrollplots noch am grössten, doch die hohe Artenvielfalt bei den niedrigen Ablagerungen und geringen Korngrößen bereits ein Jahr nach dem Ereignis spricht für eine positive Weiterentwicklung. Inwiefern die Arten sich jedoch langfristig etablieren können, kann noch nicht beantwortet werden.

6 Schlussfolgerung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Während keine deutliche Aussage über die Zusammenhänge zwischen den Klimadaten und der Vegetation auf der Murgangablagerung gemacht werden kann, sind andere Resultate signifikanter. Nach der starken Reduktion der Vegetation durch das Murgangereignis zeigen sich erste Erholungsmuster. Viele der Arten etablieren sich in feinkörnigen Bereichen und bei niedriger Ablagerungsmächtigkeit. Dass die grösste Artenvielfalt in Waldnähe und somit in der Nähe der bestehenden Vegetation beobachtet wurde, verweist darauf, dass viele Arten eine Samenquelle in unmittelbarer Nähe benötigen. *Pinus mugo Turra* verhält sich gemäss den Untersuchungsergebnissen anders. Wie auch die Literatur beschreibt, besiedelt die Art Extremstandorte, ist tolerant gegenüber felsigem Untergrund mit groben Korngrössen und vermag durch die Windverbreitung grössere Distanzen zurückzulegen. Damit zeigen die Untersuchungen bereits ein Jahr nach dem Ereignis deutliche Trends. Voraussagen über die zeitliche Entwicklung könnten höchstens in Zusammenhang mit bestehender Literatur hergeleitet werden. Da vergleichbare Studien im alpinen Raum fehlen, ist bei der Voraussage Vorsicht geboten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird darauf verzichtet.

Die statistische Analyse bestätigt Zusammenhänge zwischen den physischen Eigenschaften des Murgangs und der lokalen Vegetation. *P. mugo Turra* ist durch die Anpassung an Extremstandorte eine Pionierart und besiedelt nicht dieselben Standorte wie die meisten anderen Arten. Diese Erkenntnisse sind Hinweise auf erste Sukzessionsmuster nach dem Ereignis.

6.1.1 Beantwortung der Fragestellung

Die Zusammenfassung zeigt deutlich, dass ein Jahr nach dem Ereignis erste Verteilungsmuster der Vegetation auf der Ablagerung gezeigt werden können. Dass sich die Art *Pinus mugo* von der allgemeinen Tendenz abzeichnet, bestätigen die Untersuchungen bezüglich der Spezies *P. mugo Turra*. Aufgrund geringer Datengrösse sind die Untersuchungen bezüglich *P. mugo subsp. Uncinata* nicht aussagekräftig. Einen statistisch signifikanten Zusammenhang zwischen der Korngrösse und *P. mugo Turra* konnte nicht bestätigt werden, doch der Trend (siehe Abbildungen 20 und 21) zeigt deutlich ein höheres Vorkommen von *P. mugo Turra* bei mittleren bis grösseren Korngrössen. Auch die Mächtigkeit hat einen Einfluss auf die Vegetation. Viele Arten bevorzugen Stellen mit niedriger Ablagerungsmächtigkeit unter einem Meter. *Pinus mugo Turra* keimt im Gegensatz dazu auch in Bereichen mit grösserer Ablagerungsmächtigkeit erfolgreich. Inwiefern sich die Störung positiv auf die Vegetation auswirkt, sollte in einem Kontext längerfristiger Untersuchungen beantwortet werden. Grundsätzlich ist ein Ereignis mit einem grossen Vegetationsverlust verbunden. Inwiefern die neu entstandene Lücke die Artenvielfalt fördert oder sonstige positive Einflüsse auf die gesamte lokale Vegetation hat, kann mit den Ergebnissen der Untersuchungen dieser Arbeit nicht bewertet werden. Dazu müssten gezielt ausgewählte Arten wie Zeigerarten oder lokale Raritäten langfristig beobachtet werden. Die Etablierung von *P. mugo Turra* spricht zwar für eine erfolgreiche Wiederbesiedlung der Ablagerung, bedeutet aber keine Zunahme der regionalen Artenvielfalt, denn die Art dominiert bereits die umliegenden Wälder. Im grossskaligen Kontext bedeutet die Wiederbesiedlung der Art *Pinus mugo Turra* jedoch, dass der Pionierwald im Schweizerischen Nationalpark gute Erholungschancen hat und somit Resilienz gegenüber den Murgangereignissen zeigt.

6.1.2 Ausblick und Offene Fragen

Wie das Kapitel zu dem Stand der Forschung zeigt, ist die Biogeomorphologie noch eine junge Forschungsrichtung. Die vorliegende Arbeit kann in dieser Thematik bezüglich Vegetationsentwicklung auf Murgangablagerungen im alpinen Bereich einen Beitrag leisten. Trotz des geringen Umfangs kann sie als Wegweiser für weiterführende Forschung dienen.

Da die Arbeit eine grosse Menge Daten und eine breite Thematik aufgreift, fehlen detaillierte Analysen. Damit bleiben erwartungsgemäss viele Fragen unbeantwortet. Da es sich bei den Vegetationsdaten um eine Momentaufnahme handelt, wird erst die langfristige Untersuchung helfen, die Relevanz der Ergebnisse einzuschätzen. Offen bleibt beispielsweise die Frage, ob sich die gekeimten *Pinus mugo*-Sämlinge etablieren werden. Für den Erhalt einer Population sind zwar die Verbreitung und Keimung der Samen essenziell, doch die sensiblen Jungpflanzen müssen sich zudem auch längerfristig etablieren können. Es stellt sich die Frage, ob die beobachteten Vegetationsmuster sich im Lauf der Zeit verändern und welche sich längerfristig etablieren. Auch die Frage, ob sich durch das Ereignis positive Auswirkungen auf die Vegetation feststellen lassen, soll offenbleiben. Um diese Frage zu beantworten, wäre zu der Langzeitstudie eine vertiefte Auseinandersetzung mit der Thematik «Positive Auswirkungen auf Vegetation» wichtig, um festzulegen, welche Interessen in welchem Kontext verfolgt werden.

6.1.3 Gesamteinschätzung der Thematik

Gebirgsökosysteme sind in der heutigen Forschung eine relevante Thematik. Viele Forschungsprojekte beobachten an unterschiedlichen alpinen Standorten langfristig die Vegetation, dies zeigt, dass die Thematik sehr aktuell ist und bleibt. Der SNP bietet die seltene Gelegenheit, ein Murgang-Ereignis ausserhalb der normativen Perspektive zu betrachten. Hier ist die Massenbewegung als Ereignis ein Teil eines Systems. Wenn menschliche Infrastruktur gefährdet wird, rückt diese Perspektive in den Hintergrund. Für die Forschung bietet der SNP damit eine wichtige Ausgangslage für Grundlagenforschung, welche schliesslich in besiedelten Gebieten angewandt werden kann. In Anbetracht des Klimawandels und der Murgang-Ereignisse in Blatten (VS) stellt sich beispielsweise die Frage, inwiefern gezielte biotechnische Massnahmen zur Stabilisierung oder landwirtschaftlichen Nutzung grossflächiger Ablagerungen dienen. Um solche Fragen anzugehen, braucht es jedoch ein breites Verständnis der grundlegenden Vegetationsdynamik auf Murgang-Ablagerungen.

6.1.4 Themen für nachfolgende Arbeiten

Mit dem Ziel, eine erste Einschätzung möglicher Zusammenhänge zu liefern, bietet die vorliegende Arbeit viele Ansätze für weiterführende Arbeiten. Gezielt zeigt die Auswertung der Daten, in welchen Bereichen für zukünftige Projekte die Datenlage noch ausgebaut werden kann. Konkret würden verbesserte Logger oder ein anderer Umgang mit den Klimadaten die Möglichkeit bieten, klimatische Aspekte miteinzubeziehen. Um die Art *Pinus mugo* besser zu untersuchen, kann in Zukunft auch die Anzahl der älteren Exemplare festgehalten werden. Um langfristige Zusammenhänge mit der Korngrössendynamik festzustellen, könnte nach einigen Jahren eine erneute Korngrössenanalyse gemacht werden. Grundsätzlich würden Standortvergleiche zeigen, welche Aspekte auf allgemeine oder regionale Phänomene verweisen. Um typische Charakteristiken der untersuchten Pflanzenart *Pinus mugo* zu identifizieren, können auch Störungen untersucht werden, welche sich vom Murgang Buffalora unterscheiden. Schlussendlich kann auch die Brücke zu angewandter Biogeographie geschlagen werden und so anthropogene Fragestellungen in Gebirgsräumen aufgreifen.

7 Literaturverzeichnis

- Ahnert, F. (2015). Einführung in die Geomorphologie (5. Aufl.). utb GmbH.
<https://doi.org/10.36198/9783838586274>.
- Ballian, D., Ravazzi, C., de Rigo, D., Caudullo, G. (2016). Pinus mugo in Europe: distribution, habitat, usage and threats. European Atlas of Forest Tree Species. 124-125.
- Bezzola, D. (2023). Ökologisches Porträt der Bergföhren im Nationalpark. Bündnerwald.
<http://www.buendnerwald.ch/artikel/oekologisches-portraet-der-bergfoehren-im-nationalpark> [Online 29.07.2025].
- Cratschla. (2022). Eidgenössische Nationalparkkommission ENPK und SCNAT-Forschungskommission des SNP.
- 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: 2749–77. <https://doi.org/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: 11403.
<https://doi.org/10.1002/ece3.11403>.
- Jacquemart, M., Weber, S., Chiarle, M., Chmiel, M., Cicoira, A., Corona, C., Eckert, N., Gaume, J., Giacona, F., Hirschberg, J., Kaitna, R., Magnin, F., Mayer, S., Moos, C., Herwijnen, A. van., Stoffel M., (2024). Detecting the impact of climate change on alpine mass movements in observational records from the European Alps. Earth-Science Reviews. 258. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104886>.
- Koenig, F. (2024). Geomorphometric analysis of a debris flow event in Buffalora and catchment properties in the Swiss National Park. University of Zurich, Mathematisch-naturwissenschaftliche Fakultät. <https://doi.org/10.5167/uzh-279556>.
- Kolb, E. (2025). Sukzession einer Murgangablagerung im Schweizerischen Nationalpark. Universität Bern.
- Kremer, B.P. (2024). Landschaften und Lebensräume. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-68895-3_2.
- Mertz, P. (2017). Alpenpflanzen in ihren Lebensräumen: Ein Bestimmungsbuch. Haupt.
- MeteoSchweiz. (2022). Klimabulletin Sommer 2022. <https://www.meteoschweiz.admin.ch/service-und-publikationen/publikationen/berichte-und-bulletins/2022/klimabulletin-sommer-2022.html> [Online 29.07.2025].
- Osterkamp, W., Cliff. H. (2012). The interactions between vegetation and erosion: New directions for research at the interface of ecology and geomorphology. Earth Surface Processes and Landforms. 37, 1: 23 - 36.
- Pabst, R. J., Spies, T. A. (2001). Ten Years of Vegetation Succession on a Debris-Flow Deposit in Oregon. JAWRA Journal of the American Water Resources Association. 37, 6: 1693–1708. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb03670.x>.

- Palombo, C., Battipaglia, G., Cherubini, P., Chirici, G., Garfi, V., Lasserre, B., Lombardi, F., Marchetti, M., Tognetti, R. (2014). Warming-Related Growth Responses at the Southern Limit Distribution of Mountain Pine (*Pinus Mugo* Turra Subsp. *Mugo*). *Journal of Vegetation Science*. 25, 2: 571–83. <https://doi.org/10.1111/jvs.12101>.
- Ranke, U. (2023). *Naturkatastrophen und Risikomanagement. Geowissenschaften und soziale Verantwortung*. Springer Spektrum.
- Rice, S., Stoffel, M., Turowski, J. M., Wolf, A. (2012). Disturbance regimes at the interface of geomorphology and ecology. *Earth Surface Processes and Landforms*. 37: 1678–1682.
- Rossi, C. (2024). Datenpaket zur Murgangablagerung in Buffalora im Schweizerischen Nationalpark, Zerne. Bereitgestellt vom SNP am: 22.10.2024. [Unveröffentlichte Daten].
- Schlunegger, F., Garefalakis, P., Werthmüller, S. (2023). *Einführung in die Sedimentologie. Schweizerbart*.
- Schweizerische UNESCO-Kommission. (o.D.). *Der Mensch und die Biosphäre*. <https://www.unesco.ch/science/lhomme-et-la-biosphere/> [Online 29.07.2025].
- Schweizerischer Nationalpark a. (o. D.). *Bergföhren*. <https://nationalpark.ch/flora-und-fauna/bergfoehre/> [Online 29.07.2025].
- Schweizerischer Nationalpark b. (o. D.). *Grundlagen & Impressionen*. <https://nationalpark.ch/about/nationalpark/> [Online 29.07.2025].
- Schweizerischer Nationalpark c. (o.D.). *Vegetation*. <https://nationalpark.ch/wissenschaft/vegetation/> [Online 29.07.2025].
- Schweizerischer Nationalpark. (2008). *Leitbild Nationalpark 2008*. https://nationalpark.ch/wp-content/uploads/2023/10/Leitbild_Nationalpark_2008_def.pdf [Online 29.07.2025].
- Stiftung Schweizer Pärke (o. D.). *Schweizerischer Nationalpark*. <https://www.parks.swiss/de/die-schweizer-paerke/uebersicht/schweizerischer-nationalpark> [Online 29.07.2025].
- swisstopo a (2025). *Karte des Schweizerischen Nationalparks (Maßstab 1:200 000)* [Karte]. Bundesamt für Landestopografie. <https://geo.admin.ch/?a=b2em7oeeb4v> [Online 29.07.2025].
- swisstopo b (2025). *Geologische Übersichtskarte der Schweiz (Massstab 1:300 000)* [Karte]. Bundesamt für Landestopografie. <https://s.geo.admin.ch/9q5kol2axgxd> [Online 29.07.2025].
- Tognacca, C. (1999). *Beitrag zur Untersuchung der Entstehungsmechanismen von Murgängen*. ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-003823798>.
- U.S. Geological Survey. (o. D.). *Debris flow*. <https://www.usgs.gov/media/images/debris-flow-0> [Online 29.07.2025].
- Viles, H. A., Naylor, L. A., Carter, N. E. A., Chaput D. (2008). Biogeomorphological disturbance regimes: progress in linking ecological and geomorphological systems. *Special Issue: Geomorphology and Earth System Science*. 33, 9: 1419-1435.

- Wang, S., Meng, X., Chen, G., Guo, P., Xiong, M., Zeng, R. (2017). Effects of vegetation on debris flow mitigation: A case study from Gansu province, China. *Geomorphology*. 282. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.12.024>.
- White, P. (1979). Pattern, process, and natural disturbance in vegetation. *The Botanical Review*. 45: 229-299.
- Wipf, S., Rossi, C., von Büren, R., Gubler, S. (2024). Murgang Buffalora – Von tabula rasa zu neuem Leben. Schweizerischer Nationalpark. <https://nationalpark.ch/forschung/murgang-buffalora/> [Online 29.07.2025].
- Wohlgemuth, T., Jentsch, A., Seidl, R. (2019). *Störungsökologie*. Bern: Haupt.
- Yousefi, S., Imaizumi, F. (2024). Assessing the impact of sediment characteristics on vegetation recovery in debris flow fans: A case study of the Ohya Region, Japan. *Ecological Engineering*. 209. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107408>.

8 Daten- und Codeverfügbarkeit

Das Datenpaket des Schweizerischen Nationalparks, ist nicht öffentlich verfügbar, sondern wurde für der Autorin am 22.10.2024 als zip-Datei zur Verfügung gestellt 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.

Die Luftbilder, welche für die Erstellung der QGIS-Übersicht verwendet wurden, sind öffentlich zugänglich. Sie heissen „SWISSIMAGE Hintergrund“. Hier bezogen: <https://www.swisstopo.admin.ch/de/orthobilder-swissimage-10-cm> [online 03.02.2025].

Der R-Code, der für die Funktion von RStudio benötigt wird, ist öffentlich zugänglich und kostenlos über das Programm RStudio verfügbar. Auch die verwendeten RStudio-Packages sind in dem Programm integriert und öffentlich zugänglich.

Als Hilfsmittel für die Erstellung und Optimierung von R-Codes wurde das öffentlich zugängliche ChatGPT (GPT-4o, OpenAI) verwendet.

9 Anhang

Datensammlung Nr. 1: Vegetationsdaten vereinheitlicht

Standort	Hoehe	Anz Arten	uncinata	turra	seed_uncinata	seed_turra	Abstand Wald m
C020	1972	16	0	0	0	0	0
C040	1986	19	1	0	0	0	0
C060	2008	10	0	1	0	0	0
C080	2030	16	0	0	0	0	0
C100	2050	16	0	0	0	0	0
C120	2070	10	1	0	0	0	0
C160	2123	11	0	0	0	0	0
C200	2156	14	0	1	0	0	0
C240	2195	10	0	1	0	0	0
C280	2253	16	0	1	0	0	0
H020	1973	1	0	1	0	9	5.7
H040	1985	1	0	0	0	0	12.7
H060	2007	1	0	1	0	23	2.1
H080	2035	2	0	1	0	12	56
H100	2046	1	0	1	0	11	22.6
H120	2072	1	0	1	0	5	30
H160	2123	1	0	0	0	0	3.3
H200	2153	2	0	0	0	0	3.2
H240	2199	1	0	0	0	0	10.2
H280	2245	1	0	0	0	0	30
L020	1970	2	0	1	0	11	1.6
L040	1984	1	1	0	14	0	4.1
L060	2008	11	0	1	0	3	7
L080	2034	1	0	1	0	21	29
L100	2047	2	0	1	0	10	11.3
L120	2068	6	0	1	0	4	5.5
L160	2121	11	0	1	0	1	5.4
L200	2154	2	0	0	0	0	9
L240	2193	7	0	0	0	0	7.4
L280	2249	2	0	0	0	0	32

Datensammlung Nr. 2: Daten nach Kolb (2025)

Standort	Neigung	kg_min	kg_q16	kg_median	kg_q84	kg_max
C020	11.715					
C040	20.785					
C060	15.225					
C080	15.58					
C100	20.375					
C120	19.52					
C160	19.75					
C200	27.565	10.0002838	10.8432868	13.6939488	20.1046879	51.3532428
C240	21.67	10.0181342	10.9022882	12.9666173	19.4957825	63.7304436
C280	35.795	10.0007074	10.4785003	11.8895393	16.4530332	110.364928
H020	13.165	10.0004283	11.1061754	15.144704	24.8000206	99.7530127
H040	5.635	10.0281908	14.4820621	28.8112359	51.8188333	121.710716
H060	21.135	10.0183785	11.1450692	15.2780611	26.7297321	77.6631385
H080	9.745	10.0034792	12.6983294	20.4601653	32.4034113	66.9432178
H100	14.075	10.0279347	11.2049488	15.3648553	26.7479594	93.2371958
H120	17.33	10.000995	11.2863343	15.5548687	25.12993	97.9433702
H160	20.615	10.0040081	11.7293769	16.819299	27.48186	77.9752653
H200	23.595	10.0101018	11.7339198	17.5362089	30.8871765	92.2649071
H240	23.555	10.0002669	10.9173777	13.6473113	19.5180947	65.9582556
H280	25.93	10.002633	11.2254907	15.342226	24.3966413	100.725379
L020	6.155	10.0058035	12.1506289	19.0094939	32.4723026	84.017628
L040	13.32	10.0166291	11.21723	14.4766429	22.3250239	79.0885406
L060	18.655	10.0021956	10.6487749	12.7953247	18.1861687	78.6998471
L080	17.44	10.0173745	11.255443	15.3294515	25.100195	99.1811264
L100	16.06	10.0057034	10.829929	13.3811197	20.4018339	78.7704046
L120	17.035	10.0049207	10.5945124	12.1829258	16.5243135	53.8802422
L160	18.76	10.0196782	10.8682328	13.170811	19.6765213	87.4145261
L200	18.56	10.0010293	10.7093225	12.7453404	17.6812625	74.2963842
L240	21.77	10.003683	10.8826601	13.8202584	21.1019996	92.3193384
L280	27.12	10.0025769	10.9761486	14.4432402	23.6852041	62.3840007

Datensammlung Nr. 3: Klimadaten gesamte Zeitspanne

Name	Logger	temp_min	temp_max	temp_median	hum_min	hum_max	hum_median
C040	TL-01	-7	39.5	0	0	100	98.5
C060	TL-25	-12	33.5	3	22.5	96.5	88.8
C080	TL-04	-4.5	38	0	34	110	106.5
C120	TL-07	-11	35	3	28.5	100	92.5
C160	TL-10	-5	36.5	0	30	108.5	105.5
C240	TL-19	-4.5	37.5	1	27.5	100	97.5
C280	TL-16	-6.5	41.5	3	12	82.5	69
H020	TL-30	-8.5	33	2.5	21.5	95.5	86.5
H040	TL-02	-7.5	42.5	0.5	21	109	99.5
H060	TL-27	-4.5	34	2	28.5	99.5	93
H080	TL-05	-7	37	0	26.5	100	100
H100	TL-24	-10	36.5	4.5	15.5	98	83.5
H120	TL-09	-8	38	2	21.5	98	96
H200	TL-15	-5	42.5	1.5	15.5	100	95
H240	TL-20	-5.5	39.5	1	17.5	104.5	93.5
L040	TL-03	-12	38.5	2.5	28.5	102.5	92.5
L060	TL-26	-8.5	30.5	2.5	24	100	87.2
L080	TL-31	-4.5	33.5	0	51.5	103.5	94
L120	TL-08	-4	29.5	1	7	98.5	95.5
L160	TL-12	-7	42	1.5	16.5	109.5	102.5
L280	TL-17	-5	36.5	2	16.5	106.5	94.5

Datensammlung Nr. 4: Temperaturdaten nach Jahreszeiten

Standort	MW F Temp	Median F Temp	MW S Temp	Median S Temp	MW H Temp	Median H Temp	MW W Temp	Median W Temp
C020	1.89810	0	13.25650	11	1.92042	0	-0.20215	0
C040	1.41327	0	12.60602	10.5	2.06455	-0.25	-0.59432	-0.5
C060	2.06975	0	12.58824	11.5	1.77322	0	-0.79739	-0.5
C080								
C100								
C120	2.19520	0	12.64261	11.5	2.75307	0	-0.29327	-0.5
C160								
C200								
C240	1.61051	0.5	12.77462	11.5	3.60246	1	0.54785	0.5
C280	2.47509	-0.5	13.36320	11.5	3.72643	-0.5	-0.61287	-0.5
H020	2.55435	0.5	13.25650	12	2.32445	0.5	0.01854	0
H040	1.97622	0	14.07148	12	2.68340	0	-0.33448	-0.5
H060	1.40806	-0.5	12.38782	11.5	2.41018	-0.5	-0.54556	-0.5
H080								
H100	2.82745	0	13.50684	12.5	3.59529	1	-0.25481	0
H120	2.19678	0	13.55643	12.5	2.61339	0	-0.37660	-0.5
H160								
H200	2.47034	0	14.88235	12	4.08436	0	-0.32555	-0.5
H240	1.81884	0	13.27462	12	3.46892	0	-0.09890	0
H280								
L020								
L040	2.25996	0	13.61696	12	1.69501	0	-0.73672	-0.5
L060	2.38474	0	11.71580	11.5	2.42760	0.5	-0.13530	0
L080	2.06250	0	13.42134	12.5	2.91052	0	-0.25939	0
L100								
L120	1.08514	-0.5	11.87962	11.5	2.77766	0	-0.56433	-0.5
L160	2.04665	0	13.53078	11.5	3.63046	0	-0.19345	0
L200								
L240								
L280	1.98755	0	12.94186	11.5	3.97234	0	-0.14606	0

Datensammlung Nr. 5: Luftfeuchtigkeitsdaten nach Jahreszeiten

Standort	MW F Hum	Median F Hum	MW S Hum	Median S Hum	MW H Hum	Median H Hum	MW W Hum	Median W Hum
C020	80.9558	87.5	74.7893	78.25	83.6376	88.5	90.4766	90.5
C040	94.5760	100	74.7937	76	86.9965	97.5	99.3988	99.5
C060	93.7597	99	81.0413	84.5	83.5505	91.5	97.2765	96.5
C080								
C100								
C120	94.2905	96.5	80.1867	82.5	84.3572	95	96.7639	96.5
C160								
C200								
C240	97.3519	101	75.4548	78.5	78.4665	90.5	96.7103	96
C280	98.2173	105	75.3153	80.75	81.8828	93.5	103.1730	103
H020	98.4150	99.5	82.0283	83.75	84.0987	91.5	95.2273	96
H040	101.3320	108	70.5533	70	86.2486	100	105.3202	105
H060	95.8915	97.5	84.6350	88	89.4269	95	96.7715	96.5
H080								
H100	87.7300	91	74.7089	75.5	80.4583	90	94.1849	94
H120	102.5730	109	75.1809	79.5	87.7783	101.5	107.4562	107.5
H160								
H200	67.7300	74	56.6754	58.5	66.4228	72	75.8447	76
H240	100.0000	100	98.8139	100	84.3586	94	99.9610	100
H280								
L020								
L040	92.2502	95	74.0194	76.5	82.5430	89.5	93.6625	94
L060	94.6066	98.5	77.3567	81.5	86.1871	94.5	97.8843	97.5
L080	88.8489	93.5	75.1060	77.5	84.7793	93.5	96.9546	96.5
L100								
L120	94.3113	98	76.7551	80.5	85.7530	95.5	97.3770	97
L160	93.5360	99.5	69.2021	74.5	82.8961	95	98.5203	98.5
L200								
L240								
L280	98.8093	100	83.1244	87.5	87.2090	97.5	98.8727	99