

Master-Arbeit

Master-Studiengang in Umweltnaturwissenschaften

Analyse der Vermoosung auf Biodiversitätsförderflächen und Naturschutzflächen in der UNESCO Biosphäre Entlebuch



16. September 2024

Verfasserin: Nadine Reinert
nareiner@student.ethz.ch
18-929-620Referent: Florian Knaus
Institut für Terrestrische Ökosysteme, ETH ZürichKorreferentin: Judith Stalder
UNESCO Biosphäre Entlebuch

Titelbild: Naturschutzfläche in der Gemeinde Escholzmatt-Marbach
Quelle: eigene Aufnahme vom 4. Juni 2024

Zusammenfassung für die interessierte Öffentlichkeit

Moose sind kleine Pflanzen, die in vielen verschiedenen Lebensräumen vorkommen. Sie spielen eine wichtige Rolle in der Natur, indem sie Wasser speichern und Lebensraum für Insekten bieten. Manchmal breiten sie sich stark aus und bedecken grosse Flächen, was in der Landwirtschaft Probleme verursachen kann. Wenn zu viele Moose auf Wiesen wachsen, kann das den Ertrag verringern und die Vielfalt der Pflanzen reduzieren. Ausserdem können grosse Moosflächen auf steilen Hängen bei der Bewirtschaftung gefährlich sein. Dieses Problem der zu hohen Moosausbreitung auf einer Fläche nennt man Vermoosung.

In meiner Masterarbeit habe ich untersucht, warum Moose auf bestimmten Wiesen in der Region Entlebuch wachsen. Ich habe 63 verschiedene Wiesen untersucht und dabei viele Daten gesammelt. Auf jeder Wiese habe ich an vier verschiedenen Stellen Messungen durchgeführt, insgesamt also 252 Messpunkte. Ich wollte herausfinden, welche Faktoren das Mooswachstum resp. die Vermoosung beeinflussen.

Ich habe festgestellt, dass die Umweltbedingungen eine grosse Rolle spielen. Das Entlebuch hat viele lehmige Böden (Flysch) und ist ein Gebiet mit viel Regen. Dies sind gute Bedingungen für Moose. Auch die Lage der Wiesen, zum Beispiel ob sie an einem Schattengang oder in der Nähe eines Waldes liegen, beeinflusst das Mooswachstum. An schattigen, nördlich ausgerichteten Orten hat es mehr Moos. Auf Wiesen mit vielen hohen Pflanzen hingegen wächst weniger Moos.

Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Nutzung der Wiesen. Wiesen, die intensiver genutzt werden, haben oft weniger Moose. Das liegt daran, dass Moose empfindlich auf bestimmte Nährstoffe (Dünger, Mist etc.) reagieren, die bei intensiver Nutzung häufiger vorkommen. Die Art der Pflege, der Zeitpunkt des Mähens der Wiesen oder wie viele Pflanzen vorkommen beeinflussen die Moosdeckung nicht wesentlich. Landwirt:innen beobachten auf Flächen, die schon lange nicht mehr intensiv genutzt wurden, eine Ausmagerung. Also eine Abnahme der Blumenvielfalt und eine Zunahme der Moose. In den gesammelten Daten konnte dies jedoch nicht nachgewiesen werden.

Meine Ergebnisse zeigen, dass die Umweltbedingungen einen grossen Einfluss auf das Mooswachstum haben. Auch die Art und Weise, wie die Wiesen genutzt werden, spielt eine Rolle, jedoch weniger als die Umweltbedingungen. Durch die Bewirtschaftung kann das Mooswachstum nur leicht verringert oder erhöht werden. Speziell auf nördlich ausgerichteten, schattigeren Hängen mit einer niedrigen und lückigen Vegetation konnten mehr Moose beobachtet werden.

Insgesamt konnte ich feststellen, dass Moose in der Region Entlebuch auf fast allen Flächen vorhanden sind. Dabei ist das Ausmass der Moosausbreitung sehr unterschiedlich. Es ist aber nicht klar, ab wann das Moos zu einem Problem wird. An gewissen Orten sind Moose wichtig für einen gesunden Lebensraum. Je nach Definition haben 18% bis 46% der untersuchten Flächen eine hohe Moosdeckung resp. eine Vermoosung. Um die Moosflächen an bestimmten Orten zu reduzieren und ein Gleichgewicht zwischen Mooschutz, Pflanzenvielfalt und Landwirtschaft zu erreichen, sind weitere Untersuchungen notwendig. Langzeitstudien und Experimente könnten helfen, die Reaktionen der Moose und Pflanzen auf verschiedene Bewirtschaftungsformen besser zu verstehen. Auch die Untersuchung von weiteren Umweltbedingungen wie Bodeneigenschaften und Luftqualität könnte zusätzliche Erkenntnisse liefern.

Die Problematik der Moosverbreitung ist nicht nur in der Region Entlebuch, sondern in der ganzen Schweiz bekannt. Die Landwirtschaft ist sehr daran interessiert, nachhaltige Lösungen zu finden, die im Einklang mit der Natur stehen.

Zusammenfassung

Moose sind in vielen unterschiedlichen Lebensräumen verbreitet und leisten dort wichtige Ökosystemleistungen. Sie sind oft Erstbesiedler und bieten den nachfolgenden Arten eine Lebensgrundlage, speichern Wasser oder bilden Torf. Dabei breiten sie sich stellenweise zu Moosteppichen aus und führen zu einer Vermoosung der Fläche. Gerade in der Landwirtschaft ist dies ein Problem, denn durch die Vermoosung schwindet der Ertrag, die Biodiversität nimmt teilweise ab und zudem kann ein grossflächiger Moosteppich in steilen Lagen ein Sicherheitsrisiko für die Bewirtschaftung darstellen. Diese Probleme der Vermoosung sind speziell auf extensiv bewirtschafteten Flächen wie Biodiversitätsförderflächen und Naturschutzflächen ein immer wieder diskutiertes Thema seitens der Landwirt:innen. Daher wird in diese Masterarbeit die Vermoosung auf Biodiversitätsförderflächen und Naturschutzflächen in der UNESCO Biosphäre Entlebuch untersucht. Ziel der Arbeit ist es, die Situation der Vermoosung in der Region zu analysieren und verschiedene Bewirtschaftungs- und Umweltfaktoren zu erheben, um mögliche Einflussfaktoren der Vermoosung zu identifizieren.

Für diese Masterarbeit wurden 63 Biodiversitätsförderflächen und Naturschutzflächen untersucht, wobei auf jeder dieser Flächen vier Untersuchungspunkte an verschiedenen Standorten erfasst wurden. Dies ergibt insgesamt 252 Untersuchungspunkte, die über die gesamte Region Entlebuch verteilt sind. Dabei wurden Naturschutzflächen sowie extensiv und wenig intensiv genutzte Wiesen der Bergzone 2 und 3 im Schnittregime Standard und zusätzlich extensiv genutzte Wiesen im Schnittregime Flex untersucht. Trotz gewisser Begrenzungen repräsentierten die Untersuchungspunkte diverse unterschiedliche Charakteristika, um eine breite Datengrundlage zu erhalten. Weiter wurden Bewirtschaftungs- und Umweltvariablen durch Daten vom Kanton, GIS-Analysen oder Erhebungen im Feld erfasst. Im Feld wurde die Vermoosung anhand der visuellen Moosdeckungs-Methode (Variable Moosquadratrate) und der Punkt-Frequenz-Methode (Variable Moosfrequenz) erhoben. Die Variable Moosquadratrate misst die von oben sichtbare Moosdeckung, wohingegen die Variable Moosfrequenz die absolute Moosdeckung auf dem Untergrund misst. Die beiden Vermoosungsvariablen sowie die 16 Bewirtschaftungs- und Umweltvariablen wurden anschliessend deskriptiv ausgewertet und in gemischten linearen Modellen analysiert. Zu jeder Vermoosungsvariable wurde ein Teilmodell mit den Umweltvariablen, ein Teilmodell mit den Bewirtschaftungsvariablen und ein Gesamtmodell mit allen Variablen erstellt. Im Feld wurden zudem Q2-Zeigerpflanzen bestimmt und einzelne Moose für die spätere Bestimmung gesammelt, um weitere Informationen über die Standorteigenschaften und Vegetation zu erhalten.

Im Durchschnitt wurde über die gesamte Region ein Moosquadrat-Wert von 24.5% und eine Moosfrequenz von 50.4% gemessen. Dabei wurden Flächen ohne jegliches Moos sowie Flächen mit einer 100% Moosdeckung angetroffen. Es stellte sich heraus, dass speziell die gegebenen Umweltfaktoren die Moosdeckung stark beeinflussen. Die gesamte Region ist durch lehmige Böden (insbesondere Flysch) und den hohen Jahresniederschlag prädestiniert für viel Moos, jedoch sind lokale Unterschiede in der Moosdeckung sichtbar. Speziell auf nordseitigen Hängen und in Waldrandnähe konnte eine erhöhte Moosdeckung festgestellt werden. Dagegen wurden bei höherer, üppiger Vegetation sowie in Mulden eine geringere Moosdeckung gefunden. Da Moose gemäss Literatur schattige und feuchte Standorte mit geringer Konkurrenz bevorzugen, erwiesen sich diese Ergebnisse als schlüssig. Das verminderte Moosaufkommen in Mulden überraschte jedoch und es wird angenommen, dass dies eine Verzerrung aufgrund der nassen Bedingungen während der Feldarbeiten sowie den Nährstoffeinträgen in die Mulden ist. Die Resultate in dieser Arbeit suggerieren, dass die Umweltfaktoren einen signifikanten Einfluss auf die Vermoosung auf Biodiversitätsförderflächen und Naturschutzflächen in der UNESCO Biosphäre Entlebuch haben.

Die Literatur sowie auch die Landwirt:innen stellten fest, dass Moose sensibel auf Stickstoff reagieren und daher auf intensiver genutzten Flächen vermindert vorkommen. Diese Beobachtung konnte durch die erhobenen Daten bestätigt werden, da wenig intensiv genutzte Wiesen eine tiefere Moosdeckung aufwiesen als extensiv genutzte Wiesen und Naturschutzflächen. Von den Landwirt:innen wurde auch beobachtet, dass ältere extensive Flächen ausmagern und eine zunehmende Vermoosung sowie einen Biodiversitätsverlust aufweisen. Diese Beobachtung konnte in den Daten nicht bestätigt werden. Jedoch war ein Vergleich der einzelnen Flächen schwierig, da die Jahreszahlen bei Wechsel des Bewirtschaftenden oder Neuerfassung der Flächen teilweise aktualisiert wurden und so das Alter der Fläche verfälschten. Auch die weiteren untersuchten Bewirtschaftungsvariablen wie Qualitätsstufe, Anzahl Zeigerpflanzen, Schnittregime oder Höhenzone resp. Schnittzeitpunkt erschienen nicht weiter relevant. Interessant war jedoch, dass Naturschutzflächen vermehrt in höheren Lagen vorkamen und eine signifikant höhere Moosdeckung aufwiesen. Viele der Naturschutzflächen im Entlebuch unterliegen dem Mooschutz und sind eher feuchte Standorte, welche gut geeignet sind für Moose. Hingegen konnte beobachtet werden, dass auf trockeneren Standorten, auf denen bspw. Margeriten vorkamen, weniger Moos vorhanden war. Betrachtet man die Bewirtschaftungsfaktoren unter Berücksichtigung der Umweltfaktoren, stellte sich in den Modellen heraus, dass die Umweltfaktoren eine wichtigere Rolle spielen und den Einfluss der Bewirtschaftungsfaktoren übersteuern. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Bewirtschaftungsfaktoren die Vermoosung der Biodiversitätsförderflächen und Naturschutzflächen im Entlebuch beeinflussen, jedoch die Standorte durch ihre Umweltfaktoren für eine Vermoosung mehr oder weniger prädestiniert sind und die Moosdeckung durch die richtige Bewirtschaftung lediglich leicht reduziert werden kann.

Insgesamt konnten in der UNESCO-Biosphäre Entlebuch diverse vermooste Flächen aufgefunden werden. Dabei ist das Ausmass der Moosausbreitung sehr unterschiedlich und keine abschliessende Definition vorhanden, ab wann eine Fläche als vermoost gilt. Je nach Definition besteht bei 18% bis 46% der Flächen eine hohe Moosdeckung resp. Vermoosung. Um die Moosdeckung an bestimmten Stellen zu reduzieren und ein Gleichgewicht zwischen Mooschutz, Biodiversität und Landwirtschaft zu erreichen, sind diverse zusätzliche Untersuchungen notwendig. Speziell durch Langzeitforschung und experimentelle Ansätze hinsichtlich der Reaktion der Moosdeckung und Vegetation auf unterschiedliche Umweltbedingungen, Bewirtschaftungsformen und Störungen könnten weitere Erkenntnisse über die Thematik gewonnen werden. Die weiterführende Forschung soll die Problematik der Vermoosung nicht nur in der UNESCO Biosphäre Entlebuch, sondern gesamtschweizerisch angehen. Das Interesse von Seiten der Landwirtschaft ist gross, eine nachhaltige Lösung im Einklang mit der Natur zu erarbeiten.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Untersuchungsgebiet und Methoden	5
2.1	<i>Untersuchungsgebiet</i>	6
2.2	<i>Datenerhebung</i>	9
2.3	<i>Datenauswertung und -analyse</i>	15
2.4	<i>Zeigerpflanzen</i>	18
2.5	<i>Moosarten</i>	18
3	Ergebnisse	19
3.1	<i>Deskriptive Statistik Vermoosungsvariablen</i>	19
3.2	<i>Deskriptive Statistik Definitionsvariablen</i>	22
3.3	<i>Deskriptive Statistik Bewirtschaftungsvariablen</i>	23
3.4	<i>Deskriptive Statistik Umweltvariablen</i>	27
3.5	<i>Modelle</i>	33
3.6	<i>Zeigerpflanzen</i>	38
3.7	<i>Moosarten</i>	40
4	Diskussion	41
4.1	<i>Vermoosung von BFF und NHGF</i>	41
4.2	<i>Einfluss der landwirtschaftlichen Praktiken</i>	42
4.3	<i>Topographische und umweltbezogene Faktoren</i>	44
4.4	<i>Ergänzende Faktoren und Beobachtungen</i>	46
4.5	<i>Methodenkritik</i>	47
4.6	<i>Zukünftige Forschungsansätze</i>	50
5	Schlussfolgerung	52
	Danksagung	54
	Literaturverzeichnis	55
	Anhang	63
Anhang A	<i>Datenerhebung und -aufbereitung im GIS</i>	63
Anhang B	<i>Deskriptive Statistik Moosquadrate</i>	69
Anhang C	<i>Modelle</i>	74

1 Einleitung

Die schweizerische Landwirtschaft entwickelte sich über Jahrtausende und wurde besonders ab dem 19. Jahrhundert zunehmend intensiver (Rachoud-Schneider et al., 2007). Die Agrarrevolutionen führten zu einer intensiveren Landwirtschaft mit höheren Erträgen, aber auch zu einem Verlust der Strukturvielfalt und Biodiversität (Agroscope, 2024). Die Landschaft wurde uniformer und bot den Organismen weniger diverse Habitate. Um den daraus resultierenden Biodiversitätsrückgang zu stoppen, wurden in den 1990er Jahren die ökologischen Leistungsnachweise (ÖLN) eingeführt, zu denen auch die 1992 eingeführten Biodiversitätsförderflächen (BFF) gehören (Walter, 2022). Die Förderung dieser gemeinwirtschaftlichen Leistungen der Landwirtschaft wurde in Art. 104 der Bundesverfassung der Schweizerischen Eidgenossenschaft vom 18. April 1999 (SR 101) festgelegt. Zusätzliche Richtlinien sind in der Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft vom 23. Oktober 2013 (Direktzahlungsverordnung, DZV, SR 910.13) geregelt. Die im ÖLN enthaltenen Biodiversitätsbeiträge (Abbildung 1) sollen naturnahe Lebensräume durch eine extensive Bewirtschaftung erhalten (BLW, 2023a). Dabei werden die Biodiversitätsbeiträge in Qualitäts- und Vernetzungsbeiträge unterteilt, wobei die Qualitätsbeiträge weiter in die Qualitätsstufe 1 (Q1) und Qualitätsstufe 2 (Q2) unterteilt werden. Anhand der Anzahl Q2-Zeigerpflanzen wird entschieden, welche ökologische Qualität resp. welche Qualitätsstufe eine Fläche aufweist (Benz et al., 2018). Zusätzlich sollen die einzelnen biodiversen Lebensräume und Populationen untereinander vernetzt bleiben. Dadurch kann eine stabile Population mit einer ausreichenden genetischen Vielfalt bewahrt werden (Reck, 2013). Dieses Konzept wird anhand der Vernetzungsbeiträge gefördert. Die Vernetzungskonzepte werden regional von den Kantonen definiert (BLW, 2023a).

Neben dem Schutz von wertvollen Flächen durch die Direktzahlungsverordnung werden zusätzlich schützenswerte Naturdenkmäler der Schweiz durch das Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz vom 1. Juli 1966 (NHG, SR 451) in ihrer Erhaltung geschützt. Dabei können die Naturdenkmäler auf nationaler, kantonaler oder regionaler Ebene festgelegt werden. Der Kanton Luzern regelt seine Naturschutzflächen (NHGF) in der Natur- und Landschaftsschutzverordnung vom 4. Juni 1991 (NLV, SRL 710). Die Moore werden zusätzlich in der Verordnung zum Schutz der Moore vom 2. November 1999 (Moorschutzverordnung, SRL 712c) geregelt. Die NHGF werden von einer Fachperson beurteilt, und anschliessend wird ein Vertrag mit den Bewirtschaftenden abgeschlossen (Iawa, 2024e). In diesen Verträgen sind die von Fachpersonen beurteilten Pflanzenbestände und umzusetzenden Massnahmen festgelegt. Die Vertragsanforderungen sind für die Grundeigentümerschaften verbindlich.

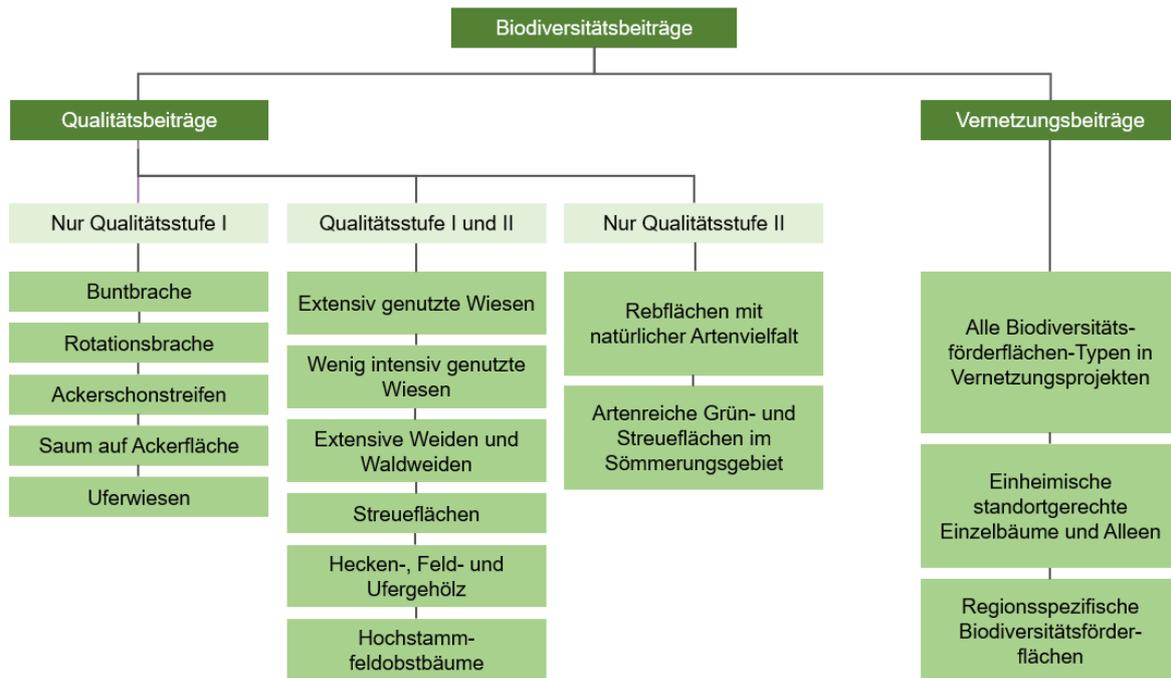


Abbildung 1: Strukturierung der Biodiversitätsbeiträge. | Quelle: BLW (2023a)

Die naturnahen Lebensräume auf den BFF und NHGF bieten wichtige Rückzugsorte für viele Arten, darunter auch Moose (Fergus et al., 2017). Auf landwirtschaftlichen Nutzflächen (LN) sind speziell extensiv bewirtschaftete Standorte für Moose geeignet, da die Konkurrenzkraft der Gefässpflanzen gehemmt ist und oft ein lückiger Bestand mit weniger Stickstoffeintrag vorhanden ist (Guntern, 2016). Moose sind die ältesten, noch lebenden Landpflanzen und gehören zu den niederen Pflanzen (Mag et al., 2002; swissbryophytes, 2024). Neben der Abwesenheit von Wurzeln besitzen sie auch keine Cuticula und nehmen daher ihre Nährstoffe und Wasser direkt über die Oberfläche auf, was sie besonders sensibel auf Schadstoffe in der Luft macht (Arróniz-Crespo et al., 2008; Aude & Ejrnæs, 2005). Durch die Intensivierung der Landwirtschaft seit den Agrarrevolutionen gingen viele Habitate für Moose verloren, was dazu führte, dass 35% der 1'100 in der Schweiz vorkommenden Moosarten gefährdet sind (Schnyder & Bergamini, 2017).

Moose erbringen diverse Ökosystemdienstleistungen und leisten einen wichtigen Beitrag zu einem gesunden und resilienten Ökosystem (Briemle (1994), zitiert nach Breunig (2004)). Einzelne Moosarten können sich jedoch in einem geeigneten Habitat auch übermässig ausbreiten, was zur sogenannten Vermoosung führt. Vermoosung wird als die unerwünschte Ausbreitung von Moos auf LN definiert, in einem Ausmass, das die Vegetationsdynamik negativ beeinflusst (Bohner et al., 2006). Speziell auf den extensiv genutzten BFF und NHGF tritt dieses Problem vermehrt auf (Huguenin-Elie, 2024), wobei sich die Moosarten in Lücken ausbreiten und so die erneute Ansamung und Keimung von weiteren Pflanzen verhindern (Hanson et al., 1998). Dabei wird bei einer Vermoosung die Biodiversität durch die Moose nicht zwingend kompensiert und die α -Diversität sinkt (Bohner et al., 2006). Diese Minderung der Biodiversität aufgrund der Konkurrenz wird in Naturschutzkreisen kritisch diskutiert (Knaus, 2023). Andererseits ist die Vermoosung auch in der Landwirtschaft ein viel diskutiertes Thema, da eine Moosausbreitung zur Abnahme der Produktivität der Flächen und zu einem Sicherheitsrisiko bei der Bewirtschaftung in steileren Hanglagen führt (Knaus, 2023). Dabei ist der Einfluss der Moosdeckung je nach Vegetationstyp und natürlichen Gegebenheiten unterschiedlich (Hanson et al., 1998). Es besteht keine klare Grenze, ab wann die Moosdeckung zu einem Problem wird. Gemäss Lichtenecker et al. (2003) kann eine Moosdeckung von 10% bereits die Vegetation beeinflussen, wohingegen sie mit 20% bereits die Vegetation wesentlich beeinflusst. Bohner et al. (2006) sprechen bei 30% von einer relativ hohen Moosdeckung und

bei 60% von einer hohen Moosdeckung. Allgemein bestehen viele Ungewissheiten im Zusammenhang zwischen Moosausbreitung und extensiver Bewirtschaftung.

Das Ziel dieser Masterarbeit besteht darin, die aktuelle Situation des Problems der Vermoosung auf BFF und NHGF zu untersuchen. Es ist noch unklar, ob es sich um ein generelles Problem oder nur um einige wenige Flächen handelt und ob es sowohl aus landwirtschaftlicher als auch aus naturschutzfachlicher Perspektive ein Problem darstellt. Weiter ist unklar, von welchen Faktoren die Vermoosung abhängt. Durch eine umfangreiche Recherche zu den Eigenschaften der Moose sowie den Standortgegebenheiten sollen grundlegende Erkenntnisse zur Thematik der Vermoosung und deren Auswirkungen erarbeitet werden. Mittels Erhebungen in einem Untersuchungsgebiet – der UNESCO Biosphäre Entlebuch (UBE) – wird die Situation genauer untersucht und mögliche Einflussfaktoren identifiziert. Dabei liegt das Hauptaugenmerk der Masterarbeit auf folgenden Forschungsfragen:

Frage 1 Inwiefern sind die BFF und NHGF in der UBE von einer Vermoosung betroffen?

Hypothese 1 Es wird erwartet, dass die BFF und NHGF in der UBE vermehrt von einer Vermoosung betroffen sind, da die Region über ein nasses, mildes Klima sowie lehmige Böden verfügt (meteoblue, 2024; Schüpbach, 2002), was günstige Voraussetzungen für das Mooswachstum sind. Dabei wird vermutet, dass die Moosdeckung auf den Flächen signifikant variiert, abhängig von spezifischen landwirtschaftlichen Praktiken, topographischen Gegebenheiten und weiteren umweltbezogenen Faktoren (Briemle et al., 1998; Fergus et al., 2017). Es wird angenommen, dass Flächen mit geringer Bewirtschaftungsintensität und Lichtverfügbarkeit sowie hoher Feuchtigkeit eine stärkere Vermoosung aufweisen (Huguenin-Elie, 2024; Urmi et al., 2007; Zechmeister & Moser, 2001).

Frage 2 Welche landwirtschaftlichen Bewirtschaftungs- und Managementstrategien begünstigen oder hemmen die Vermoosung auf BFF und NHGF in der UBE?

Hypothese 2 Es wird angenommen, dass einzelne landwirtschaftliche Praktiken und Managementmethoden die Vermoosung auf BFF und NHGF in der UBE hemmen oder begünstigen. Dabei wird vermutet, dass die Düngung resp. der Stickstoffeintrag die Vermoosung hemmt (Arróniz-Crespo et al., 2008; Hanson et al., 1998). Der direkte Einfluss der Düngung ist stärker als der indirekte Effekt durch die erhöhte Pflanzenbiomasse der Düngung, welche die Moosausbreitung hemmt (Boch et al., 2018). Weiter wird angenommen, dass ältere BFF und NHGF eine erhöhte Vermoosung aufweisen aufgrund der fortgeschrittenen Ausmagerung und der Veränderung der Artenzusammensetzung ohne zwingende Zunahme der Artenvielfalt (Bohner et al., 2006; Jeschke, 2008). Zusätzlich wird erwartet, dass die Vermoosung mit steigender Biodiversität aufgrund von grösseren Ressourcenkonkurrenz abnimmt (Fergus et al., 2017). Aufgrund der Erkenntnisse in van Klink et al. (2017) wird angenommen, dass das Schnittregime und der Schnittzeitpunkt keinen bedeutsamen Einfluss auf die Vermoosung haben. Weitere Faktoren, die möglicherweise einen Einfluss auf die Vermoosung haben könnten – bspw. Beweidung (Bergamini, Peintinger, et al., 2001) oder Bodenverdichtung durch die verwendeten Maschinen (Feige, 1982) – können aus Ressourcengründen in dieser Arbeit nicht analysiert werden, werden jedoch in der Interpretation und Diskussion der Resultate berücksichtigt.

Frage 3 Welche topographischen und umweltbezogenen Faktoren begünstigen oder hemmen die Vermoosung auf BFF und NHGF in der UBE?

Hypothese 3 Es wird angenommen, dass einzelne topographische und umweltbezogene Faktoren die Vermoosung auf BFF und NHGF in der UBE hemmen oder begünstigen. Dabei wird angenommen, dass die Vermoosung an nordexponierten Hanglagen und Standorten mit hoher Beschattung höher ist (Bohner et al., 2006). Durch Lichtmangel oder extensive Bewirtschaftung können lückige Vegetationen entstehen, wodurch das Mikroklima verändert wird (Fergus et al., 2017; Jeschke, 2008). In Vegetationslücken können sich Moose gut gegen die in ihrer Konkurrenzkraft gehemmten Grünlandpflanzen durchsetzen (Briemle (1994), zitiert nach Breunig (2004)). Zudem wird vermutet, dass eine hohe Feuchtigkeit des Substrats und der Luft die Vermoosung begünstigen (Urmi et al., 2007). Weiter soll die Mikrotopografie inkl. der Position am Hang einen Einfluss auf die Vermoosung haben (Richner et al., 2014; Schnyder & Bergamini, 2017), wobei in Mulden sowie oberen Hangbereichen eine höhere Vermoosung erwartet wird (Liu et al., 2020; Richner et al., 2014). Es wird davon ausgegangen, dass die Höhenlage einen leicht signifikanten Einfluss auf die Vermoosung hat, wobei die Vermoosung mit steigender Höhe zunimmt aufgrund von kleinerer Konkurrenz und besseren Umweltbedingungen in höheren Lagen (Zechmeister, 2014). Weitere Faktoren, die möglicherweise einen Einfluss auf die Vermoosung haben könnten – Nährstoffeintrag über die Luft, pH-Wert sowie weitere Bodeneigenschaften (Guntern, 2016; Schnyder & Bergamini, 2017) – können aus Ressourcen Gründen in dieser Arbeit nicht analysiert werden, werden jedoch in der Interpretation und Diskussion der Resultate berücksichtigt.

Das Untersuchungsgebiet UBE wird von landwirtschaftlichen Streusiedlungen geprägt (UBE, 2024b). Die Landwirtschaft ist ein wichtiger Wirtschaftszweig der Region (LUSTAT, 2023a; UBE, 2024b), und die Entwicklung der Landwirtschaft entspricht der gesamtschweizerischen Entwicklung: Die Anzahl Betriebe nimmt ab, während die Fläche und Anzahl Tiere je Betrieb zunimmt (Baur, 1999). Die heterogene Landschaft beinhaltet viele wertvolle und naturnahe Flächen, wobei der Anteil an naturnahen Flächen im Entlebuch im Verhältnis zur Gesamtschweiz hoch ist (Knaus, 2011). Das Interesse der Landwirtschaft an der Thematik der Vermoosung ist gross. Es haben bereits diverse Landwirt:innen der UBE vermooste Flächen gemeldet. Aus den hier erwähnten Gründen ist die UBE ideal, um die Thematik der Vermoosung zu untersuchen und eine Forschungsgrundlage für zukünftige Untersuchungen zu erarbeiten.

2 Untersuchungsgebiet und Methoden

In einem ersten Schritt wurden Recherchearbeiten zu den theoretischen Grundlagen und dem Untersuchungsgebiet durchgeführt (Abbildung 2). Dadurch konnten die passenden Untersuchungspunkte für die Analysen definiert, eine Methodik zur Erhebung der Vermoosung entwickelt sowie Vorbereitungen für die Feldarbeit getätigt werden. Daraufhin wurden die notwendigen Daten digital oder im Feld erhoben. Anschliessend konnten die gesammelten Daten aufbereitet und ausgewertet werden. Die Datenaufbereitungen und -auswertungen wurden mit dem Statistikprogramm "R" resp. "RStudio" (R Core Team, 2023) durchgeführt. Feldarbeiten, Datenaufbereitungen und -analysen mit Hilfe des Geoinformationssystem (GIS) wurden mit dem Programm "ArcGIS Pro" (Esri Inc, 2021) sowie "ArcGIS Online" inkl. dem integrierten "Field Maps Designer" (Esri Inc, 2024a) ausgeführt.



Abbildung 2: Grafische Darstellung des angewendeten Vorgehens, aufgeteilt in drei Blöcke.

2.1 Untersuchungsgebiet

Untersucht wurde die Vermoosung in der Luzerner Region Entlebuch¹, welche im südwestlichen Teil des Kantons Luzern liegt und aus den sieben Gemeinden Doppleschwand, Entlebuch, Escholzmatt-Marbach, Flühli, Hasle, Romoos, Schüpfheim sowie den Ortsteilen Schachen und Werthenstein besteht (Schmidt et al., 2016). Stand 2022 wohnen dort 16'890 Personen (LUSTAT, 2023b). Das Entlebuch ist durch seine ökologisch wertvolle Landschaft sowie die landwirtschaftliche Nutzung geprägt (UBE, 2024b). Es umfasst 39'445 ha, wovon 18'594 ha landwirtschaftlich genutzt werden (Stand 2016, LUSTAT (2021)). Davon werden wiederum rund 3'000 ha extensiv bewirtschaftet (Knaus, 2011). Im Jahr 2001 wurde die Region mit ihren Moorlandschaften, Alpweiden, Karstlandschaften und weiteren Naturschätzen von der UNESCO als Biosphärenreservat ausgezeichnet (UBE, 2024c). 2008 ist das Entlebuch zum ersten regionalen Naturpark von nationaler Bedeutung der Schweiz ernannt worden (Schweizer Pärke, 2024). Wobei eine nachhaltige Bewirtschaftung und Nutzung der Landschaft die Erhaltung der ökologischen und kulturellen Werte des Entlebuchs ermöglichen soll.

Der Untergrund des Entlebuchs besteht aus Mergelschichten, Nagelfluh oder Sandstein. Dabei sind lehmige Böden, insbesondere Flysch, besonders häufig (Schüpbach, 2002). Die meisten Böden sind sauer, wobei teilweise das Kalkgestein eine Versauerung vermindern kann. Allgemein verfügt die Region Entlebuch über einen verhältnismässig hohen Jahresniederschlag mit teilweise intensiven Niederschlags- und Hagelereignissen. Aufgrund des hohen Niederschlags sind die Böden von Hangerosion und Nährstoffauswaschungen gefährdet. Auf den Terrassen des Haupttals hingegen bildeten sich auf der Molasse häufig fruchtbare Böden (Bühler, 1940). Durch die hohe Windexposition der Terrassen und das wechselhafte Relief liegen die Durchschnittstemperaturen etwas tiefer als in den umliegenden Regionen (meteoblue, 2024; Schüpbach, 2002).

2.1.1 Wahl der Untersuchungsflächen und -punkte

Es wurden anvisiert 64 Flächen zu untersuchen, um eine möglichst breite Sicht auf die Moosproblematik zu erhalten. Die Landwirt:innen meldeten 24 dieser Flächen im Verlauf der letzten drei Jahre der UBE als vermoost (UBE, 2024a). Zusätzlich wählte ein Zufallsgenerator (Google LLC, 2024) weitere 40 BFF und NHGF aus, um eine objektive Sicht auf die Moosproblematik zu gewährleisten. Bestimmte Eigenschaften sind aus methodischen Gründen ausgeschlossen worden: Es wurden nur extensiv genutzte Wiesen (EW), wenig intensiv genutzte Wiesen (WiW) sowie NHGF untersucht. Der Vergleich zwischen EW und WiW ermöglicht die Überprüfung des Einflusses der Nutzungsintensität resp. des Nährstoffeintrags (Boch et al., 2018). Gemäss BLW (2023a) dürfen EW nicht gedüngt werden, während bei WiW leichte Düngung mit Mist oder Kompost erlaubt ist. In beiden Kulturtypen sind Pflanzenschutzmittel ohne Ausnahmebewilligung verboten, und eine Beweidung ist erst ab dem ersten September bis zum 30. November erlaubt (Agroscope, 2024). Andere BFF-Typen wie extensiv genutzte Weiden dürfen hingegen schon früher beweidet werden. Aufgrund der lokalen Düngung durch Dung und Urin sowie durch selektives Grasens und Trittbelastung weisen diese Weiden eine hohe Heterogenität auf, die die Moose beeinflusst (Bergamini, Peintinger, et al., 2001). Diese grosse Heterogenität ist schwer fassbar, weshalb auf die Untersuchung von extensiven Weiden verzichtet wurde. Auch Uferwiesen sind nicht untersucht worden, da sie aufgrund ihrer maximalen Breite von 12 m einen grossen Randeffect aufweisen (BLW, 2023b). Streuwiesen sind Feucht-/Nassstandorte und weisen daher natürlicherweise ein grösseres Moosvorkommen auf, weshalb auch diese nicht untersucht wurden. Trockenwiesen und -weiden sind ebenfalls nicht untersucht worden, da diese in der Region nur sehr vereinzelt und schwer zugänglich vorkommen (BAFU, 2022).

¹ Im weiteren Verlauf des Berichts nimmt der Begriff "Entlebuch" oder UBE auf die Region der UNESCO Biosphäre Entlebuch Bezug, es sei denn, es wird explizit auf die Gemeinde Entlebuch verwiesen.

EW sowie WiW können unterschiedlich bewirtschaftet werden. Die Wiesen müssen mindestens einmal jährlich gemäht werden, wobei drei unterschiedliche Schnittregime angewendet werden können (BLW, 2023b; IAW, 2019): Beim Schnittregime Standard dürfen die Flächen je nach Höhenlage nicht vor dem 15. Juni, 1. Juli oder 15. Juli genutzt werden. 10% der Restfläche muss stehen bleiben, wobei der Standort der Restfläche variieren soll (maximal ein Jahr am selben Ort). Beim Schnittregime Staffelmahd können bereits maximal drei Wochen vor dem offiziellen Schnitttermin 40% bis 60% der Fläche genutzt werden. Die restlichen 40 bis 60% müssen mindestens drei Wochen später genutzt werden. Bei der Variante Flex wird der erste Schnitttermin frei gewählt. Jedoch muss jeder folgende Schnitt bis zum ersten September ein Nutzungsintervall von mindestens acht Wochen haben. Ab dem ersten September gibt es kein minimales Nutzungsintervall mehr. Weiter ist die Ernte bis Ende August als Dürrfutter, nicht als Silage, zu verwenden. Um den Einfluss des Schnittregimes auf die Moosdeckung zu überprüfen, wurden die Schnittregime Flex und Standard auf EW untersucht. Aufgrund der geringen Anzahl an WiW wurde dort nur das Schnittregime Standard untersucht. Das Schnittregime Staffelmahd ist gar nicht untersucht worden, da es in der UBE selten vorkommt (IAW, 2024c). Zusätzlich wurden jeweils Flächen mit der Q1 und Q2 untersucht, um unterschiedliche ökologische Ausgangslagen zu erhalten. Es sind ausschliesslich Flächen in der Bergzone 2 (BZ2) und 3 (BZ3) betrachtet worden, da die anderen Höhenzonen in der Region kaum vorkommen oder die Erreichbarkeit der Flächen zu zeitaufwändig gewesen wäre, sodass das Kosten-Nutzen-Verhältnis in Rahmen dieser Arbeit nicht angemessen war. Die beiden Bergzonen unterscheiden sich in ihrem Schnitttermin aber nicht in den erhaltenen Direktzahlungsbeiträgen (AG-RIDEA, 2024).

Ein Teil der untersuchten BFF kann zusätzlich als NHGF eingeordnet werden. Diese schützenswerten BFF verfügen über eine besondere ökologische Qualität (Naturschutz, 2019). Um diese zu erhalten, verfügen die meisten NHGF über zusätzliche Bewirtschaftungsanforderungen wie eigene Schnittzeitpunkte oder besondere Handhabung des Schnittguts (IAW, 2024e). Diese zusätzlichen Bewirtschaftungsanforderungen haben Vorrang zu den Bestimmungen der Biodiversitätsbeiträge.

Zusammenfassend wurden die Höhenzonen BZ2 und BZ3 von EW, WiW und NHGF mit der Q1 und Q2 im Schnittregime Standard sowie bei EW zusätzlich im Schnittregime Flex untersucht (Tabelle 1). Eine gleichmässige Verteilung der Flächenanzahl in allen Kategorien sowie zwischen den als vermoost gemeldeten und zufällig ausgewählten Flächen gewährleistete eine ausgewogene Datengrundlage. Eine Untersuchungsfläche musste im Laufe der Feldarbeiten ausgeschlossen werden, da die Fläche aus Sicherheitsbedenken nicht erreichbar war, weshalb schlussendlich nur 63 der 64 ausgewählten Flächen untersucht wurden.

Tabelle 1: Übersichtsmatrix der Untersuchungsflächen aufgeteilt nach Kulturtyp, Qualitätsstufe, Schnittregime und Höhenzone sowie eine farbliche Unterscheidung zwischen Flächen, welche der UBE als vermoost gemeldet wurden (gelb) und Flächen die zufällig ausgewählt wurden (grün).

	Qualitätsstufe	Schnittregime	BZ2		BZ3		Total
Extensiv genutzte Wiesen	Q1/Q2	NHG	5	4	5	4	18
	Naturschutz Ergebnis		5	4	5	4	18
	Q1	Flex	3	3	0	3	9
		Standard	2	2	1	2	7
	Q1 Ergebnis		5	5	1	5	16
	Q2	Flex	1	2	1	2	6
	Standard	4	3	1	2	10	
Q2 Ergebnis		5	5	2	4	16	
Extensiv genutzte Wiesen Ergebnis			15	14	8	13	50
Wenig intensiv genutzte Wiesen	Q1/Q2	NHG	0	2	0	2	4
	Naturschutz Ergebnis		0	2	0	2	4
	Q1	Flex	0	0	0	0	0
		Standard	0	2	0	2	4
	Q1 Ergebnis		0	2	0	2	4
	Q2	Flex	0	0	0	0	0
	Standard	0	2	1	2	5	
Q2 Ergebnis		0	2	1	2	5	
Wenig intensiv genutzte Wiesen Ergebnis			0	6	1	6	13
Gesamtergebnis			15	20	9	19	63

Als weiterer Schritt wurden die Untersuchungsflächen im GIS-Datensatz (lawa, 2024a) selektiert und mit den fehlenden Informationen aus den Tabellen zu den Bewirtschaftenden (lawa, 2024b) und Naturschutzflächen (lawa, 2024d) ergänzt. Es sind nur Flächen untersucht worden, die mindestens 10 a gross waren. Ein Pufferstreifen von 5 m am Rand der Flächen half den Einfluss der angrenzenden Flächen resp. den Randeffect zu minimieren (Sadava et al., 2019). Für jede Untersuchungsfläche sind vier zufällig positionierte Untersuchungspunkte generiert worden, um die Mikrotopographie und Heterogenität der Fläche mit einzubeziehen (Hanson, 1950). Die zufällige Positionierung der Untersuchungspunkte fand mit Hilfe eines GIS-Tools statt (Anhang A1). Mit den insgesamt 252 Untersuchungspunkten (Abbildung 3) waren genügend Datenpunkte je erklärende Variable vorhanden, um ein statistisch aussagekräftiges Modell aufzubauen (Hemmerich, 2024).

Sensible Daten zu den Flächen und Bewirtschaftenden bleiben aus Daten- und Personenschutzgründen vertraulich. Dies beinhaltet die von der UBE bereit gestellten Daten in UBE (2024a). Weiter betrifft dies auch die Angaben aus den von der Dienststelle Landwirtschaft und Wald des Kantons Luzern (lawa) zur Verfügung gestellten LAWIS-Auszügen² in lawa (2024a, 2024b, 2024c, 2024d).

² LAWIS ist das landwirtschaftliche Informationssystem der kantonalen Verwaltung, für die transparente Datenerfassung und Administration aller relevanter Informationen eines Landwirtschaftsbetriebs (Weber, 2024).

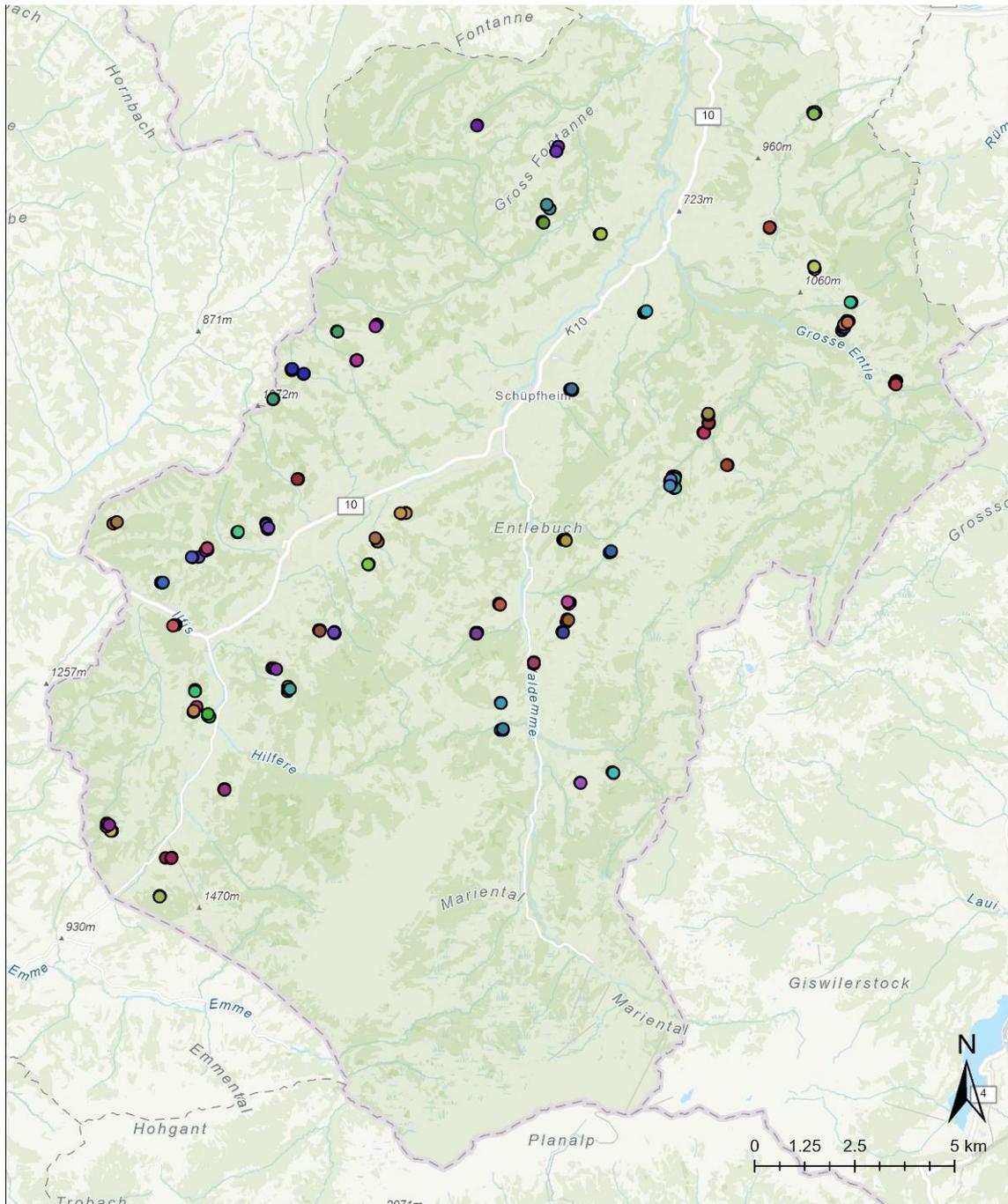


Abbildung 3: Untersuchungspunkte in der UBE, farblich gruppiert nach Untersuchungsfläche (Auf dieser Auflösungsebene kann es zu Überlagerungen der einzelnen Untersuchungspunkte kommen).

2.2 Datenerhebung

Während den Rechercharbeiten wurden die Variablen zur Erhebung der Moosdeckung, der Bewirtschaftungsart und der Umweltbedingungen definiert (Tabelle 2). Variablennamen sind im folgenden Text fettgekennzeichnet und deren Benennung im Datensatz in Klammern angegeben. Die Wahl der Variablen basiert auf Recherchen zu den Habitatbedingungen der Moose und den Einflüssen, die auf Moose wirken. Sie ist unter anderem abgeleitet von der Vegetationsaufnahme von Braun-Blanquet (1964), Setzpfand (2001) und Ellenberg & Leuschner (2010), jedoch an die Bedingungen dieser Arbeit angepasst.

Tabelle 2: Übersichtstabelle der untersuchten Variablen mit deren Datentyp und Ausprägungen in analoger Reihenfolge zum Text in den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2.

Variablenname	Datentyp	Ausprägungen
Flächen-ID	Numerisch	-
Punkt-ID	Text	-
Kulturtyp	Kategorisch	EW, WiW
Höhenzone	Kategorisch	BZ2, BZ3
Schnittregime	Kategorisch	Standard, Flex, NHG
Qualitätsstufe	Kategorisch	Q1, Q2
Alter BFF	Numerisch	1992 bis 2023
Fläche BFF	Numerisch	Are (a)
Gemeldet	Kategorisch	Ja, Nein
Exposition	Kategorisch	Nord, Ost, Süd, West
Hangneigung	Numerisch	0 bis 90°
Sonneneinstrahlung	Numerisch	Wattstunden pro Quadratmeter (Wh/m ²)
Höhe über Meer	Numerisch	Meter (m)
NDVI	Numerisch	-1 bis +1
Erhebungsdatum	Datum	TT.MM.JJJJ
Geländemorphologie	Kategorisch	Oberer Hangbereich, Mittlerer Hangbereich, Unterer Hangbereich, Mulde, Kuppe, Flach
Vegetationshöhe	Numerisch	Zentimeter (cm)
Moosquadrate	Numerisch	0 bis 81
Moosfrequenz	Numerisch	0 bis 100
Pflanzenfrequenz	Numerisch	0 bis 100
Bodenfrequenz	Numerisch	0 bis 100
Zeigerpflanzen	Kategorisch	Liste Anhang A6
Bemerkung	Text	-

2.2.1 Digitale Datenerhebung

Informationen zur Bewirtschaftung der Flächen wurden aus dem LAWIS-Auszug bezogen (Iawa, 2024c). Die **Flächen-ID** (BPO.ID) diente dazu, jeden Untersuchungspunkt seiner Untersuchungsfläche zuzuordnen. Alle Untersuchungspunkte derselben Untersuchungsfläche unterlagen demselben Bewirtschaftungsmanagement. Die **Punkt-ID** (Punkt.ID) diente zur individuellen Identifizierung jedes Untersuchungspunktes. Ergänzende Informationen zur Aufbereitung der Untersuchungspunkte sind im Anhang A1 ersichtlich.

Der **Kulturtyp** (ABK.TYP) gab Informationen zur Nutzungsart und -intensität (Bergamini & Pauli, 2001). Des Weiteren waren der Schnittzeitpunkt und die Vegetationsperiode wichtig, da dies die Möglichkeit der Absamung der Vegetation beeinflusst (Iawa, 2019). Diese Informationen konnten über das **Schnittregime** (SCHNITTREGIME) sowie die **Höhenzone** (LZCODE) gewonnen werden (Abbildung 4). Anhand der

Qualitätsstufe (Qualitätsstufe) wurde eine grobe Einstufung der botanischen Vielfalt und ökologischen Qualität gemacht. Durch das **Alter BFF** (BEGINN) ist in Erfahrung gebracht worden, wie lange die Fläche schon extensiv resp. wenig intensiv genutzt wurde und dementsprechend, wie lange die Nährstoffverfügbarkeit bereits vermindert war sowie wie lange die Vegetation Zeit hatte, sich an die veränderte Nährstoffverfügbarkeit anzupassen (Wigger, 2024). Anhand der **Fläche BFF** (FLAECHE.BFF) konnten Flächen, die aufgrund ihrer Grösse stark vom Randeffect geprägt sind, aussortiert werden (BLW, 2020).

In der Variable **Gemeldet** (Gemeldet) ist notiert worden, ob die Flächen gemäss UBE (2024a) als vermoost gemeldet wurden.

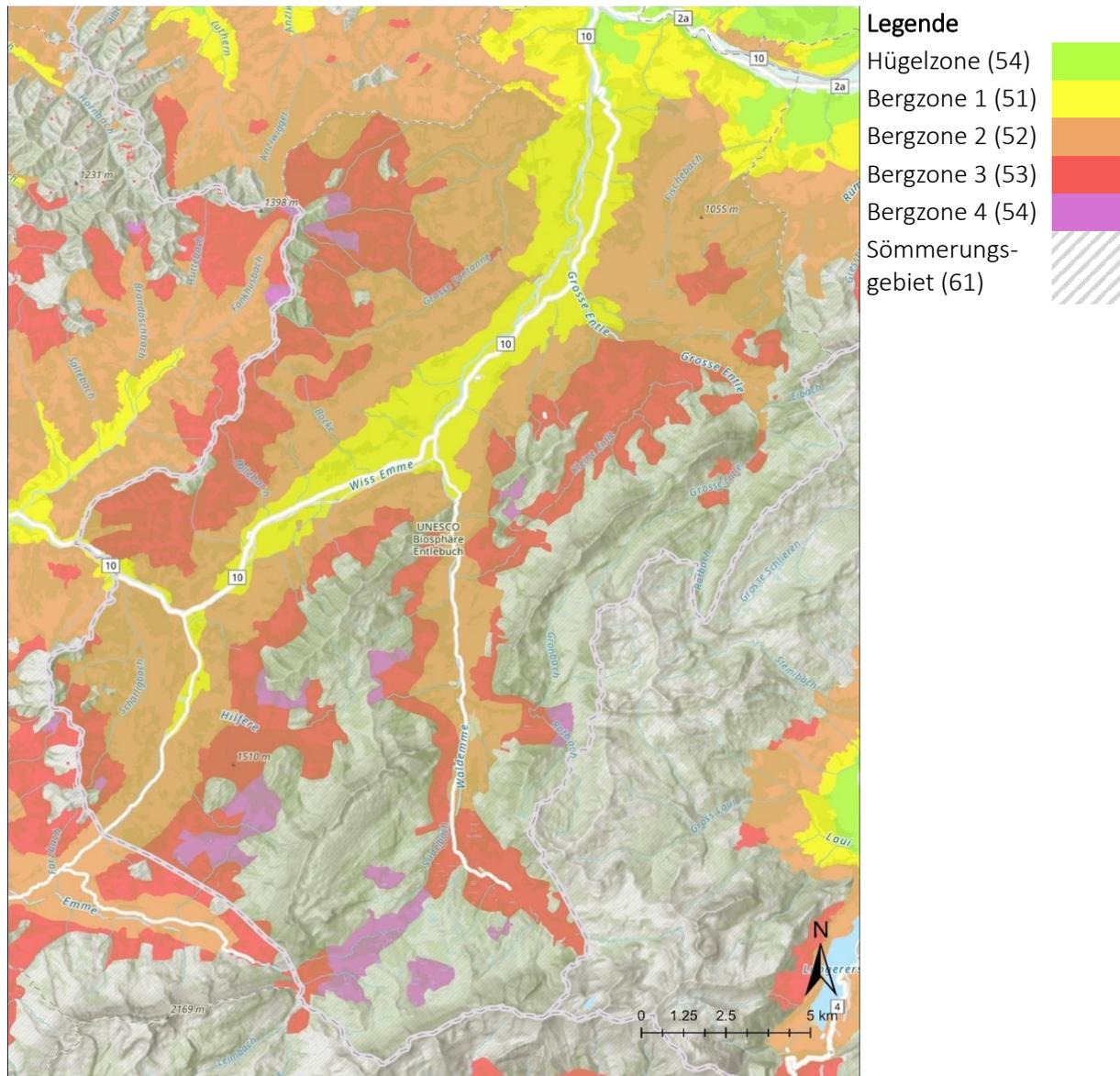


Abbildung 4: Landwirtschaftliche Zonengrenzen der Höhenzonen in der Region Entlebuch. | Quelle: BLW (2024)

Die Lichtverfügbarkeit und Feuchtigkeit sind wichtige Wachstumsfaktoren für Moose (Kaufmann & Berg, 2014). Daher wurde für jeden Untersuchungspunkt die **Exposition** (Aspect) – unterteilt in die vier Kategorien Nord, Ost, Süd und West – sowie die **Hangneigung** (Slope) und **Sonneneinstrahlung** (T0) im GIS berechnet. Im Weiteren ist die **Höhe über Meer** (Z) sowie der Normalisierte Differenz-Vegetationsindex resp. **NDVI** (NDVI_2018) bestimmt worden. Der NDVI quantifiziert die Vegetationsdichte und-gesundheit anhand von Satellitenbildern (Giuliana, 2019). Es wird der Unterschied, zwischen dem von der Vegetation stark reflektierten Nahinfrarotlicht und dem von der Vegetation absorbierten, roten Licht gemessen,

wobei die Skala von -1 (unfruchtbares Land) bis +1 (fruchtbares Land) reicht (Spektrum, 2001). Ergänzende Informationen zur Erhebung der einzelnen Variablen im GIS sind im Anhang A2 bis A4 beschrieben und visualisiert.

2.2.2 Datenerhebung im Feld

Alle notwendigen Daten, welche nicht digital erhoben werden konnten, wurden im Rahmen der dreiwöchigen Feldarbeiten von Mitte Mai bis Mitte Juni 2024 gesammelt. Vorab sind alle Landwirt:innen der Untersuchungsflächen kontaktiert worden, um diese über die Feldarbeiten zu informieren und deren Einverständnis zu erhalten. Zur Kontaktaufnahme sind die von der Dienststelle IAWA bereitgestellten Kontaktdaten genutzt worden (IAWA, 2024b). Für eine effiziente Planung und Durchführung der Feldarbeiten vor dem ersten Schnitt, wurden die Untersuchungsflächen vorab systematisch aufgeteilt:

1. BZ2 und Schnittregime Flex
2. BZ2 und Schnittregime Standard sowie NHGF
3. BZ3 und Schnittregime Flex
4. BZ3 und Schnittregime Standard sowie NHGF

Die Flächen wurden dann weiter in geografische Regionen und Feldtage unterteilt. Die Fortbewegung zwischen den einzelnen Flächen und Punkten erfolgte zunächst mit dem Auto, anschliessend zu Fuss oder durch den Transport eines/einer Landwirt:in. Zusätzlich war an den meisten Feldtagen aufgrund der Wetterbedingungen eine zweite Person erforderlich, die bei der Datenerhebung unterstützte. Die genaue Lokalisierung der Untersuchungspunkte erfolgte mittels Feldtablet, welches von der UBE bereitgestellt wurde. Auf dem App "Field Maps Designer" waren die Untersuchungspunkte, die zu erhebenden Variablen sowie die weiteren Eigenschaften der Punkte ersichtlich und konnten mittels GPS des Tablets geortet werden. Bei jedem Untersuchungspunkt ist genau dasselbe Vorgehen angewendet worden: Am Untersuchungspunkt wurde ein Holzrahmen mit 110 cm auf 110 cm vorsichtig in die Vegetation gelegt. Weiter ist die Vegetation im Holzrahmen fotografiert und mit der Punkt-ID versehen worden. Im vorgefertigten Field-Maps-Formular auf dem Feldtablet wurde das **Erhebungsdatum** (Erhebungsdatum) notiert. Um die heterogene Mikrotopografie der Fläche zu berücksichtigen, wurde die **Geländemorphologie** (Gelaendemorphologie) aufgeschrieben (Schnyder & Bergamini, 2017). Jedem Untersuchungspunkt konnte dabei nur einer der sechs Geländemorphologie-Kategorien (Anhang A5) zugeordnet werden, wobei die Kategorien Mulde und Kuppe eine höhere Gewichtung erhielten als die anderen Kategorien. Dementsprechend wurde ein Untersuchungspunkt in einer Mulde resp. Kuppe immer als solches kategorisiert, egal in welchem Hangbereich dieser vorkam. Da Moose eine mittlere Lichtverfügbarkeit mit genügend Feuchtigkeit bevorzugen, und diese Aspekte stark von den darüberliegenden Vegetationsschichten beeinflusst wird, wurde die **Vegetationshöhe** (Vegetationshoehe) gemessen (Bergamini, Pauli, et al., 2001; Zechmeister, 2014). Dafür wurde an den vier äusseren Ecken des Holzrahmens die Höhe der nächst-höchsten Pflanze gemessen und den Durchschnitt der vier Messungen berechnet, um so die durchschnittliche maximale Vegetationshöhe zu erhalten.

Der zuvor erwähnte Holzrahmen wurde spezifisch für die Erhebung der Vermoosung gebaut. Die Vermoosung wurde nur innerhalb des Holzrahmens an den vier Untersuchungspunkten je Fläche erhoben, da eine Aufnahme der gesamten Fläche nicht verhältnismässig gewesen wäre. Der Holzrahmen verfügt über ein regelmässiges Raster mit Schnüren im Abstand von 11.11 cm (Abbildung 5). Dabei entstanden innerhalb des Holzrahmens ein Untersuchungsquadrat von 1 m² mit insgesamt 100 Schnittpunkten der Schnüre sowie 81 Subquadraten zwischen den Schnüren. Es ist nur der eine Quadratmeter innerhalb der 81 Subquadrate betrachtet worden, wobei die restlichen 5 cm je Aussenseite zur besseren Sichtbarkeit der Vegetation dienten und nicht weiter beachtet wurden. In diesem Untersuchungsquadrat wurde nun die visuelle Moosdeckung-Methode gemäss Braun-Blanquet et al. (1932) sowie die Punkt-Frequenz-

Methode nach Goodall (1951) angewendet. Die Konstruktion und Messmethoden sind u. a. aus Vanha-Majamaa et al. (2000) abgeleitet und an die bestehenden Bedingungen angepasst worden. Die Methode der visuellen Moosdeckung diente zur Erhebung der Variable **Moosquadratur** (Moosquadratur). Gemäss Beobachtungen kommen Moose teils versteckt in der untersten Vegetationsschicht vor oder sind bereits von oben gut sichtbar. Speziell grossflächige Moosteppiche können die Vegetation durch ihre flächige Ausbreitung in ihrer Keimung hindern (Hanson, 1950). Dieser Aspekt der Vegetationsdynamik konnte durch die nachfolgend beschriebene Moosfrequenz nicht erhoben werden. Dabei wurde bei der Erhebung der Moosquadratur gezählt, wie viele der 81 Subquadrate im Untersuchungsquadrat eine von oben durch die Vegetation visuell sichtbare Moosdeckung grösser als 7.55 cm^2 (Fläche einer Fünf-Franken-Münze) aufwies (Wirth et al., 2018). Eine Fünf-Franken-Münze konnte einfach zur Selbstkalibrierung mitgenommen werden. Es konnten Werte der Moosquadratur zwischen null und 81 erzielt werden.

In einem nächsten Schritt wurde die **Moosfrequenz** (Moosfrequenz) erhoben. Moose sind oft unter der mehrschichtigen Vegetation versteckt und nicht gut ersichtlich (Bohner et al., 2006), weshalb sich die Punkt-Frequenz-Methode zur Bestimmung der Moosfrequenz einer Fläche eignet. Im Untersuchungsquadrat wurde jeweils an den Schnittpunkten der horizontalen und vertikalen Schnüre, mittels einer Stricknadel, das Moosvorkommen am Boden gemessen (blaue Punkte in Abbildung 5 links). Die Vegetation wurde zur Seite gerückt und an jedem der 100 Schnittpunkte die Stricknadel in den Boden gesteckt und überprüft, ob diese Moos berührt oder nicht (binär – ja/nein). Mit einem Handzähler konnten die totalen Berührungspunkte mit Moos aufsummiert werden, um die Moosfrequenz über das gesamte Untersuchungsquadrat zu erhalten. Die Werte der Moosfrequenz lagen zwischen null und 100.

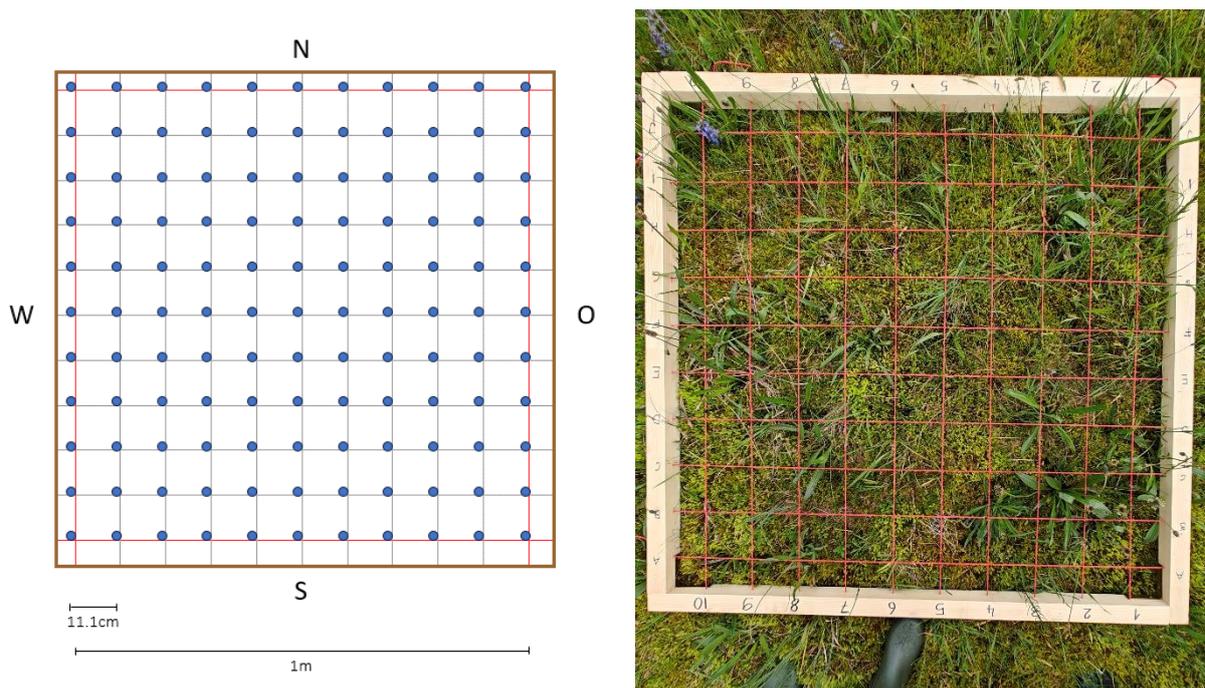


Abbildung 5: Links: Grafische Darstellung der Vorrichtung für die Probeflächenentnahme mit dem Holzrahmen in braun, Untersuchungsquadrat in Rot, weitere Schnüre in grau und Aufnahmepunkte in blau; Rechts: Untersuchungsquadrat im Feld mit roten Schnüren unterteilt. | Quelle rechts: eigene Aufnahme vom 24.05.2024

Parallel zur Erhebung der Moosfrequenz wurde die Boden- und Pflanzenfrequenz erhoben. Eine Moosausbreitung kann die Vegetationszusammensetzung verändern, wobei ein in der untersten Vegetationsschicht dominierender Moosteppich die Ansammlung neuer Pflanzen verhindern kann (Bohner et al., 2006). Anhand der Variable **Pflanzenfrequenz** (Pflanzenfrequenz) konnte die Auswirkung der Moose auf die Vegetation gemessen werden. Analog zur Moosfrequenz wurde an den Schnittpunkten der Schnüre eine Stricknadel in den Boden gesteckt. Die Pflanzenfrequenz entsprach der Anzahl der Schnittpunkte,

bei denen die Stricknadel lebende höhere Pflanzen berührte. In Fällen, in denen die Stricknadel keine lebenden höheren Pflanzen (Abbildung 6 links) oder keine lebenden höheren Pflanzen und keine Moose berührte (Abbildung 6 rechts), wurde dieser Punkt nicht gezählt, da keine höheren Pflanzen vorhanden waren. Ein Untersuchungsquadrat mit dichter, üppiger Vegetation hätte dementsprechend eine Pflanzenfrequenz von 100 aufgewiesen, wohingegen ein Untersuchungsquadrat innerhalb eines grossen Moosteppichs oder vegetationsfreien Erdbereichs eine Pflanzenfrequenz von null aufgewiesen hätte.

Des Weiteren herrscht in der wissenschaftlichen Diskussion Uneinigkeit, ob Moose andere Vegetation verdrängen oder ob sie sich in vorhandenen Lücken ausbreiten und somit der restlichen Vegetation den Platz zur erneuten Ansamung streitig machen (Huguenin-Elie, 2024). Um diese Fragestellung zu untersuchen, ist zusätzlich die **Bodenfrequenz** (Bodenfrequenz) gemessen worden. Analog zur Moos- und Pflanzenfrequenz wurde an den Schnittpunkten der Schnüre eine Stricknadel in den Boden gesteckt. Die Bodenfrequenz entsprach der Anzahl der Schnittpunkte, bei denen die Stricknadel weder lebende höhere Pflanzen noch Moos, sondern nur den Boden berührte (Abbildung 6 rechts). Ein Untersuchungsquadrat mit dichter, üppiger Vegetation oder mit einem ausgeprägten Moosteppich würde also eine Bodenfrequenz von null aufweisen, wohingegen ein Untersuchungsquadrat auf einem vegetationsfreien Erdbereich die Bodenfrequenz 100 aufweisen würde.

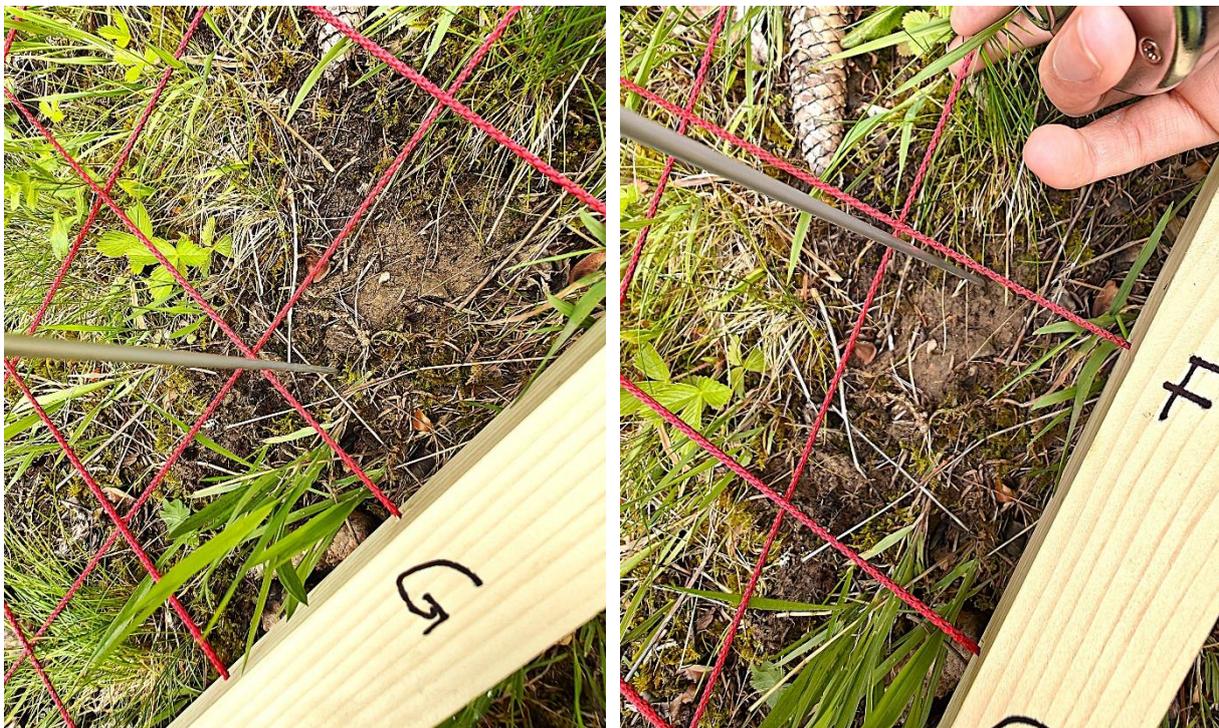


Abbildung 6: Links: Stricknadel, die nur Moose aber keine lebenden höheren Pflanzen berührt. Rechts: Stricknadel, die weder lebende höhere Pflanzen noch Moos berührt. | Quelle links: eigene Aufnahme vom 22.05.2024; Quelle rechts: eigene Aufnahme vom 22.05.2024

Im Rahmen der digitalen Datenerhebungen konnte die ökologische Qualität der Flächen anhand der Qualitätsstufe abgeschätzt werden. Um einen tieferen Einblick in die klimatischen, bodenkundlichen und topographischen Eigenschaften eines Standorts und dem daraus resultierenden Ertragspotential und ökologischen Potential abzuschätzen, wurden zusätzlich die Q2-Zeigerpflanzen³ innerhalb des Untersuchungsquadrats bestimmt (Bohner, 2015). Die Feldarbeiten fanden vor dem ersten Schnitt statt, damit die vorhandenen **Zeigerpflanzen** (Zeigerpflanze1-10) im Untersuchungsquadrat erhoben werden konnten. Zur Bestimmung der Zeigerpflanzen wurde die Liste von Benz et al. (2018) verwendet (Anhang A6)

³ In diesem Bericht bezieht sich die Erwähnung von Zeigerpflanzen, sofern nicht anders angegeben, stets auf Q2-Zeigerpflanzen.

und bei Unsicherheiten die Apps "PlantNet" (PlantNet, 2024) und "FloraHelvetica" (Wagner et al., 2023) oder die Expertin und Korreferentin Judith Stalder konsultiert.

Im Laufe der Feldarbeiten wurden immer wieder interessante Beobachtungen und Erkenntnisse gemacht. Oft erfolgte die Begleitung durch Landwirt:innen, die interessante Informationen zur Geschichte und dem Zustand der Fläche erzählten. Diese Informationen wurden als **Bemerkung** (Bemerkung) notiert und sollen zur Interpretation der Daten beitragen.

Alle Erhebungen im Feld wurden direkt im vorbereiteten, offline verfügbaren Formular von "Field Maps Designer" notiert sowie täglich automatisch ins "ArcGIS Online" übertragen.

2.3 Datenauswertung und -analyse

2.3.1 Datenaufbereitung

Die im Feld erhobenen Daten wurde zusammen mit den digital erhobenen Daten vom "Field Maps Designer" über "ArcGIS Online" auf "ArcGIS Pro" exportiert. Die Daten wurden kontrolliert, strukturiert und als Excel-File heruntergeladen, damit diese später in "R" verwendet werden konnten. Vom GIS ins Excel sind die in einer Domain definierten Daten als Subtyp-Beschreibung heruntergeladen worden. Die **Anzahl Zeigerpflanzen** (AnzahlZeiger) je Untersuchungspunkte wurde berechnet und als Variable abgespeichert. Zusätzlich sind die Datums-Variable Erhebungsdatum in eine fortlaufende, numerische Variable **Erhebungsreihenfolge** (Erhebungsreihenfolge) umgewandelt worden. Der Variable Schnittregime wurde bei allen NHGF das Schnittregime NHG zugeordnet, da diese aufgrund anderen Auflagen bzgl. Schnittzeitpunkt etc. von den beiden anderen Schnittregimen Flex und Standard abweichen (Iawa, 2024d).

Um eine einheitliche und übersichtliche Formatierung und Datenerarbeitung zu garantieren, wurde in "R" ein Grundlagentext erstellt. Darin sind benötigte Packages installiert, Formatierungen und Farbpaletten vorgegeben, Funktionen definiert sowie eine Ordnerstruktur festgelegt. Zusätzlich ist im Grundlagentext der Datentyp aller Variablen definiert. Zur Datenaufbereitung im Grundlagentext ist das Package "dplyr" (Wickham et al., 2023) verwendet worden.

2.3.2 Deskriptive Statistik

Sämtliche Analysen wurden für beide Vermoosungsvariablen – Moosquadratrate und Moosfrequenz – durchgeführt. Das methodische Vorgehen wird nur einmal beschrieben, wobei die beiden Variablen unter dem Begriff "Vermoosungsvariablen" zusammengefasst werden. Falls Unterschiede im Vorgehen bestehen, werden diese explizit erläutert.

In Excel wurde der Mittelwert der Vermoosungsvariablen sowie deren Standardabweichung je Untersuchungsfläche berechnet. Aufgrund der hohen Variabilität zwischen den einzelnen Untersuchungspunkten innerhalb derselben Untersuchungsflächen wurden keine weiteren Analysen auf Ebene der Untersuchungsflächen durchgeführt.

Weiter sind in "R" verschiedene deskriptive Variablen wie Mittelwert, Median, Range, Modus etc. der Vermoosung auf Ebene der Untersuchungspunkte berechnet worden. Das Package "DescTools" (Signorell, 2024) diente zur Berechnung des Modus. Die Werte werden jeweils in Prozent Moosdeckung der Untersuchungsfläche von 1 m² angegeben, um eine Vergleichbarkeit zwischen den beiden Vermoosungsvariablen sicherzustellen. Weiter wurde ein Histogramm sowie ein QQ-Plot der Häufigkeiten sowie der Residuen erstellt, um die Verteilungsform zu bestimmen. Zudem überprüfte der Shapiro-Wilk-Test und der Kolmogorov-Smirnov-Test die Daten auf eine Normalverteilung (Aldor-Noiman et al., 2013) sowie wurden die Bedingungen einer Normalverteilung wie bspw. die Homoskedastizität oder

Überdispersion kontrolliert (Frost, 2018). Dafür sind die Pakete "lmerTest" und "performance" verwendet worden (Lüdecke, 2024; Zeileis, 2022). Zur Darstellung der Ergebnisse wurde jeweils das Paket "ggplot2" sowie "gridExtra" verwendet (Auguie, 2017; Wickham et al., 2016). Zur Übersicht der Daten wurden die Signifikanzen und Korrelationen zwischen den Vermoosungsvariablen und den einzelnen Einflussvariablen berechnet. Da die beiden Vermoosungsvariablen diskrete Datentypen sind wurde für den Zusammenhang mit anderen diskreten oder kontinuierlichen Variablen eine Spearman-Rangkorrelation durchgeführt sowie ein Scatterplot inkl. linearer Trendline und Konfidenzintervall erstellt (Walther, 2022). Mit ordinalen und nominalen Variablen mit mehr als zwei Kategorien wurde der Kruskal-Wallis-Test durchgeführt sowie ein Boxplot erstellt (Walther, 2024). Mit ordinalen und nominalen Variablen mit nur zwei Kategorien (binär) wurde der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt sowie ein Boxplot erstellt (Walther, 2023). Um den Fehler 1. Art zu minimieren, sind alle Tests mit der Bonferroni-Korrektur gemäß Formel 1 korrigiert worden (Armstrong, 2014). Basierend auf den drei Definitionsvariablen, sieben Bewirtschaftungsvariablen und neun Umweltvariablen wurde eine 5%-Signifikanzniveau bei einem p-Wert von 0.0026 berechnet.

Formel 1: Bonferroni-Korrektur⁴

$$\frac{\alpha}{T} = \frac{0.05}{19} = 0.0026$$

Weiter wurden, aufgrund von Hypothesen aus der Literatur oder von den Landwirt:innen, zusätzliche Zusammenhänge zwischen einzelnen Einflussvariablen geprüft. Dazu gehört bspw., ob die Beobachtung der Landwirt:innen, dass die Artenvielfalt mit dem Alter einer BFF abnimmt, in den Daten nachweisbar ist. Mit den NHGF wurden zusätzliche Analysen mit den Variablen in lawa (2024d) durchgeführt. Aufgrund einer zu geringen Datengrundlage wurde diese Analysen jedoch wieder verworfen.

2.3.3 Modelle

Für beide Vermoosungsvariablen sind drei Modelle erstellt worden: ein Teilmodell mit den Bewirtschaftungsvariablen, ein Teilmodell mit den Umweltvariablen sowie ein Gesamtmodell mit allen Variablen. Für alle Modelle wurde dasselbe Vorgehen angewendet: Anhand des Varianz-Inflationsfaktors des Packages "car" (Fox, 2023) wurde die Multikollinearität der einzelnen Variablen überprüft. Variablen mit Multikollinearität wurden bei Möglichkeit zusammengefügt. Bspw. wurden die Variablen Schnittregime und Naturschutz in der Variable Schnittregime kombiniert (siehe Kapitel 2.3.1), da in diesen Variablen Redundanzen auftraten. Alle numerischen Variablen wurden skaliert und zentriert, um Konvergenzprobleme zu minimieren. Da die Variable Moosquadrat linkschief war und die Bedingungen einer Normalverteilung nicht erfüllte, wurde diese mit einer Quadratwurzel transformiert, um eine robustere Datenlage zu erhalten. Auch die Variable Moosfrequenz wurde analog transformiert. Die zusätzliche Box-Cox-Transformation der Moosfrequenz sollte dazu beitragen, dass die Daten besser den Anforderungen einer Normalverteilung entsprechen (Box & Cox, 1964). Die Box-Cox-Transformation dient zur Normalisierung und Stabilisierung der Varianz der Daten. Dabei werden die Daten mit dem Exponenten Lambda (λ) potenziert (Formel 2). Die Bestimmung von λ erfolgt über die Maximum-Likelihood-Funktion. Im Fall der Moosfrequenz wurden die Werte vor der Box-Cox-Transformation mit eins addiert, um null-Werte zu vermeiden. Zur Durchführung der Transformation wurde das Package "MASS" verwendet (Ripley, 2024).

Formel 2: Box-Cox-Transformation⁵

$$y_t = \frac{(y^\lambda - 1)}{\lambda}$$

⁴ Wobei α der kritische p-Wert und T die Anzahl Tests darstellt.

⁵ Wobei y_t der transformierte Wert, y der ursprüngliche Wert und λ der berechnete Box-Cox-Parameter von 1.354 darstellt.

Da die transformierten Vermoosungsvariablen eine Normalverteilung aufwiesen und die Bedingungen einer Normalverteilung erfüllten, wurde ein gemischtes lineares Modell (LMM) mit Hilfe des Pakets "lme4" (Bates et al., 2024) verwendet. Als Random-Effekt wurde die Flächen-ID genutzt, da auf jeder Untersuchungsfläche mehrere Untersuchungspunkte aufgenommen wurden und die Untersuchungsflächen einige gemeinsame Charakteristika aufwiesen. Weiter sind die Bewirtschaftungsvariablen Kulturtyp, Höhenzone, Schnittregime, Qualitätsstufe, Anzahl Zeigerpflanzen, Alter BFF und Fläche BFF sowie die Umweltvariablen Exposition, Hangneigung, Höhe über Meer, Geländemorphologie, Sonneneinstrahlung, Bodenfrequenz, Pflanzenfrequenz und Vegetationshöhe verwendet worden. In einem ersten Gesamtmodell wurden zusätzlich die beiden Definitionsvariablen Erhebungsreihenfolge und Gemeldet inkludiert, um die Signifikanz der Reihenfolge der Untersuchungspunkte zu messen sowie zu überprüfen, ob die gemeldeten Flächen eine höhere Moosdeckung aufwiesen. Die Variable NDVI wurde von den Modellen aufgrund ihrer hohen räumlichen Ungenauigkeit ausgeschlossen.

Um das optimale Modell zu finden, wurden die Daten zunächst mittels Test-Train-Split-Methode in zwei Teile aufgeteilt: ein Trainingsdatensatz und ein Testdatensatz. Diese Methode dient dazu, die Leistung des Modells auf neuen, unabhängigen Daten zu überprüfen und Überanpassung zu vermeiden (Khanna, 2024). Zur Modellselktion wurde eine schrittweise Regression durchgeführt: Diese bestand einerseits aus dem Intercept-Only-Modell, das nur die Vermoosungsvariable enthielt, und andererseits aus dem Gesamtmodell mit allen möglichen Einflussfaktoren einschliesslich des Random-Effekts. Zur Auswahl des besten Modells ist die Dredge-Funktion des Pakets "MuMIn" (Barto, 2024) verwendet worden, wobei das Modell mit dem niedrigsten Akaike Information Criterion (AIC) bevorzugt wurde. AIC ist zur Bestimmung des besten Vorhersagemodells gut geeignet (Chakrabarti & Ghosh, 2011). Durch die schrittweise Regression konnte ermittelt werden, welche Einflussfaktoren resp. Variablen einen relevanten Einfluss auf die Vermoosungsvariablen haben.

Das beste Modell aus der schrittweisen Regression wurde weiter optimiert und auf den Testdatensatz angewendet. Dieser Vorgang wurde mit einigen manuellen Anpassungen wiederholt, bis das beste Modell eruiert werden konnte. Die endgültige Auswahl des optimalen Modells basierte auf der Restricted Maximum Likelihood (REML) sowie dem marginalen und konditionalen Bestimmtheitsmass (R^2). Der Modelloutput wurde analysiert und die Schätzwerte und t-Werte der Kategorien interpretiert. Aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes wurden zur Bestimmung der Signifikanz der Variablen die kritischen t-Werte der Standardabweichung angenommen (Kohn & Öztürk, 2022). Bei kategorialen Daten war im Modeloutput die erste Kategorie als Referenzkategorie festgelegt. Alle anderen Kategorien sind im Vergleich zur Referenzkategorie ausgewertet worden. Für numerische Variablen galt der Mittelwert als Referenz.

Um den Estimate des Modelloutputs zu interpretieren, kann der Estimate der Moosquadrat-Modelle quadriert werden, da die ursprüngliche Transformation eine Quadratwurzel war (Formel 2). Bei den Moosfrequenz-Modellen muss zuerst die Box-Cox-Transformation, einschliesslich der Addition von Eins, rückgängig gemacht werden (Formel 3). Abschliessend wird, analog zur Moosquadratrate-Transformation, die Quadratwurzel durch Quadrieren des resultierenden Wertes aufgehoben.

Formel 3: Rücktransformation Moosquadratrate⁶

$$y = (y_t)^2$$

Formel 4: Rücktransformation Moosfrequenz⁷

$$y = \left(\left((\lambda \cdot y_t + 1)^{\frac{1}{\lambda}} \right) - 1 \right)^2$$

⁶ Wobei y_t die transformierte Variable Moosquadratrate und y die ursprüngliche Variable Moosquadratrate darstellt.

⁷ Wobei y_t die transformierte Variable Moosfrequenz, y die ursprüngliche Variable Moosfrequenz und λ der berechnete Box-Cox-Parameter von 1.354 darstellt.

2.4 Zeigerpflanzen

Alle angetroffenen Zeigerpflanzen je Untersuchungspunkt sind in einzelnen Variablen (Zeigerpflanze 1-10) abgespeichert. Zur Analyse wurden die Daten mit Hilfe des Pakets "tidyr" in ein long-Format konvertiert (Wickham, 2024), in welchem jede Zeigerpflanze jedes Untersuchungspunkts eine einzelne Zeile erhielt.

Es sind verschiedene deskriptive Statistiken der Anzahl Zeigerpflanzen berechnet worden. Zur Visualisierung der Häufigkeitsverteilung der Zeigerpflanzen wurde die prozentuale Häufigkeit der Zeigerpflanzen über alle Untersuchungspunkte hinweg berechnet und in einem horizontalen Balkendiagramm dargestellt. Dies ermöglicht eine klare Übersicht über die Verteilung und Häufigkeit der verschiedenen Zeigerpflanzen. Die Erhebungen wurden nach Zeigerpflanze gruppiert, um den Mittelwert und die Standardabweichung der Vermoosungsvariablen je Zeigerpflanze zu berechnen und in einem Scatterplot mit Standardabweichungsbalken darzustellen. Dabei sind Zeigerpflanzen, welche weniger als neun Mal angetroffen wurden, nicht dargestellt worden. Bei neun Messungen konnte sichergestellt werden, dass die Zeigerpflanze auf mindestens drei unterschiedlichen Untersuchungsflächen angetroffen wurde und somit eine variable Datengrundlage bestand.

Bei den einzelnen Zeigerpflanzen gelten die Zeigerwerte nach Ellenberg & Leuschner (2010). Da jedoch die Zeigerpflanzen oft nur in Pflanzengruppen bestimmt werden und die Pflanzen innerhalb einer Gruppe teilweise unterschiedliche Zeigerwerte haben (Benz et al., 2018), wurden keine weiteren Analysen der Zeigerpflanzen gemacht. Dies bedeutet auch keine Berechnung der β -Diversity oder des Species-Diversity-Index (Slack, 1984).

2.5 Moosarten

Im Laufe der Feldarbeiten wurden besonders auffällige oder häufig vorkommende Moose gesammelt. Diese Moose sind in beschrifteten Briefumschlägen aufbewahrt und zur Bestimmung nach Hause genommen worden. Durch das Besprühen der Proben mit Wasser erhielten die Moose wieder ihre natürliche Form und konnten fotografiert werden. Mit Hilfe des Buchs von Wirth et al. (2018) sowie Frahm & Frey (2004) wurden erste grobe Bestimmungen durchgeführt. Die Fotos sind zur genauen Bestimmung an den Experten Ariel Bergamini von der eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) zugesendet worden. Auf diese Weise konnten die Moosarten präzise identifiziert werden.

Die ökologischen Eigenschaften und Zeigerwerte der Moose nach Ellenberg & Leuschner (2010) wurden recherchiert. Ökologische Zeigerwerte dienen als Hinweis auf die einwirkenden Umweltfaktoren und deren Intensität (Wirth, 2010), wobei sie hier zusätzliche Erkenntnisse zu den ökologischen Eigenschaften und den Standortgegebenheiten der Mooshabitats liefern konnten.

3 Ergebnisse

3.1 Deskriptive Statistik Vermoosungsvariablen

3.1.1 Moosquadrate

Der Mittelwert der Variable Moosquadrate lag bei einer sichtbaren Moosdeckung von 24.5% der Fläche, während der Median bei 7.4% lag (Abbildung 7 links). Das 25. Quantil lag bei 0%, während das 75. Quantil 44.4% erreichte. Der Modus, der sich 70-mal wiederholte, betrug 0%, was bedeutet, dass rund ein Drittel der Untersuchungspunkte keine von oben sichtbare Moosbedeckung aufwiesen (Abbildung 7 rechts). Es wurden Werte vom Minimum 0% bis zum Maximum 100% gemessen. Die Varianz betrug 979.2 und die Standardabweichung lag bei 31.3%.

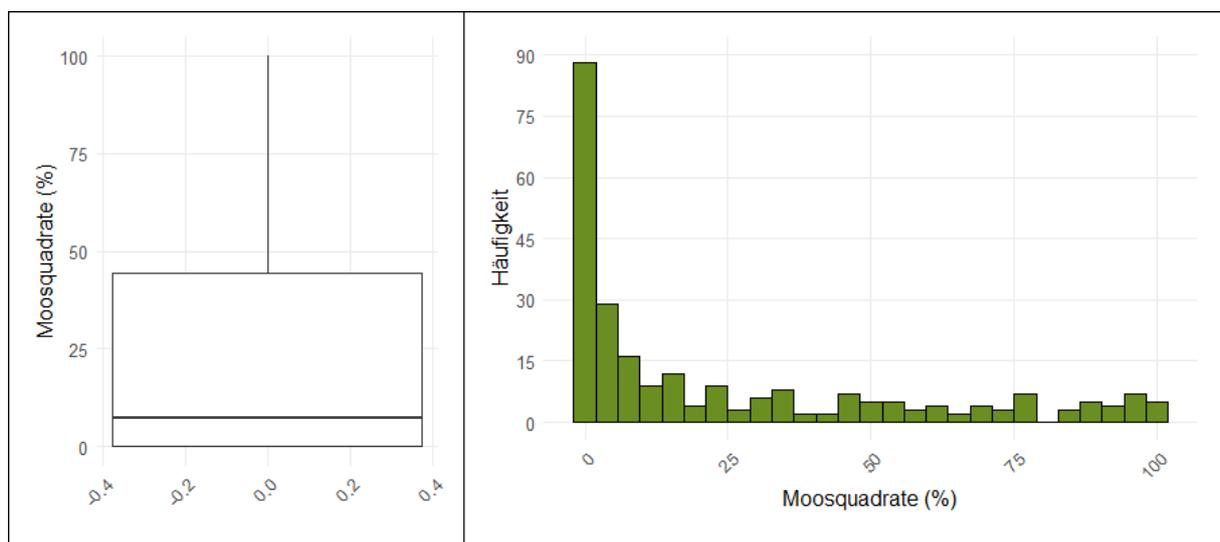


Abbildung 7: Links: Darstellung der deskriptiven Werte wie Spannweite, Median, 25. und 75. Quantil der Vermoosungsvariable Moosquadrate in Prozent. Rechts: Häufigkeitsverteilung der Vermoosungsvariable Moosquadrate in Prozent mit einem Bin von 27.

Die Residuen der transformierten Variable Moosquadrate waren um den Mittelwert null zentriert und wiesen eine glockenförmige Struktur mit leichter Linksschiefe auf (Abbildung 8 links). Die überlagerte Normalverteilungskurve sowie Normalverteilungslinie passte gut zu den Residuen, was auf eine annähernde Normalverteilung der Residuen hinwies. Ab ± 2.5 waren Ausreisser mit einer leicht erhöhten Abweichung von der Normalverteilungslinie erkennbar (Abbildung 8 rechts). Der Shapiro-Wilk-Test ergab einen p-Wert von 0.321, weshalb die Nullhypothese, dass eine Normalverteilung vorliegt, angenommen wurde. Auch der p-Wert von 0.552 des Kolmogorov-Smirnov-Tests deutete darauf hin, dass keine signifikante Abweichung von einer Normalverteilung bestand. Gemäss Breusch-Pagan-Test mit einem p-Wert von 0.085 konnte die Nullhypothese, dass Homoskedastizität vorliegt, angenommen werden.

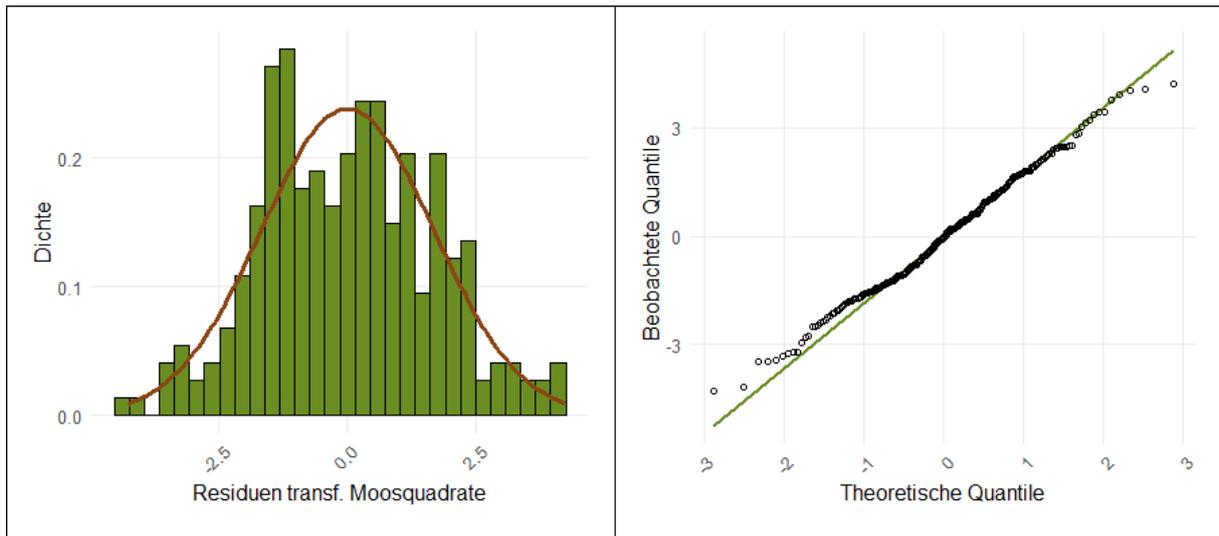


Abbildung 8: Links: Residuen-Verteilung der transformierten Vermoosungsvariable Moosquadrate mit einem Bin von 30 und einer Normalverteilungskurve (braun). Rechts: Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte der transformierten Vermoosungsvariable Moosquadrate mit Normalverteilungslinie (grün).

3.1.2 Moosfrequenz

Der Mittelwert der Moosfrequenz lag bei 50,3%, und der Median betrug 51% (Abbildung 9 links). Die Verteilung der Moosfrequenz zeigte, dass das 25. Quantil bei 17% und das 75. Quantil bei 83% lag. Es gibt zwei Modi, bei 0% und 74% (Abbildung 9 rechts). Die Spannweite der Moosfrequenz reicht von 0% bis 100%, was die gesamte Bandbreite der Werte abdeckt. Die Varianz betrug 1116,3 und die Standardabweichung lag bei 33,4%.

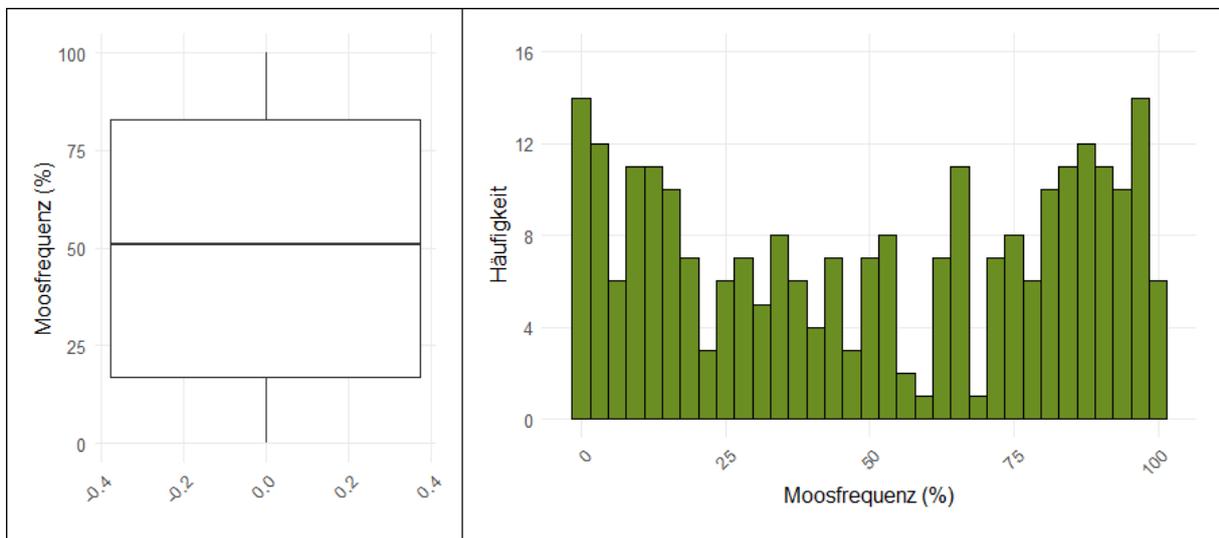


Abbildung 9: Links: Darstellung der deskriptiven Werte wie Spannweite, Median, 25. und 75. Quantil der Vermoosungsvariable Moosfrequenz in Prozent. Rechts: Häufigkeitsverteilung der Vermoosungsvariable Moosfrequenz in Prozent mit einem Bin von 33.

Die Residuen der transformierten Variable Moosfrequenz zentrierte sich um den Mittelwert Null (Abbildung 10 links). Sie wiesen eine glockenförmige Struktur auf, wobei eine schwache Rechtsschiefe erkennbar war. Die überlagerte Normalverteilungskurve passte gut zu den Residuen, was auf eine annähernde Normalverteilung der Residuen hindeutete. Ab -2 und +2,5 waren leichte Ausreißer, welche von der Normalverteilungslinie abwichen, vorhanden (Abbildung 10 rechts). Der Shapiro-Wilk-Test ergab einen p-Wert von 0,061, wobei die Nullhypothese, dass eine Normalverteilung vorliegt, bei einem 5%

Signifikanzniveau knapp angenommen werden konnte. Auch der p-Wert von 0.745 des Kolmogorov-Smirnov-Tests deutete darauf hin, dass keine signifikante Abweichung von einer Normalverteilung bestand. Gemäss Breusch-Pagan-Test mit einem p-Wert von $1.889E-4$ musste die Nullhypothese, dass Homoskedastizität vorliegt, abgelehnt werden. In den Modellen wurde daher mit der zusätzlich Box-Cox transformierten Variable Moosfrequenz gearbeitet, welche keine Heteroskedastizität aufwies und besser auf die Bedingungen einer Normalverteilung abgestimmt war. Zur Vergleichbarkeit der beiden Vermoosungsvariablen wurde in der deskriptiven Statistik auf die Transformation der Variablen verzichtet.

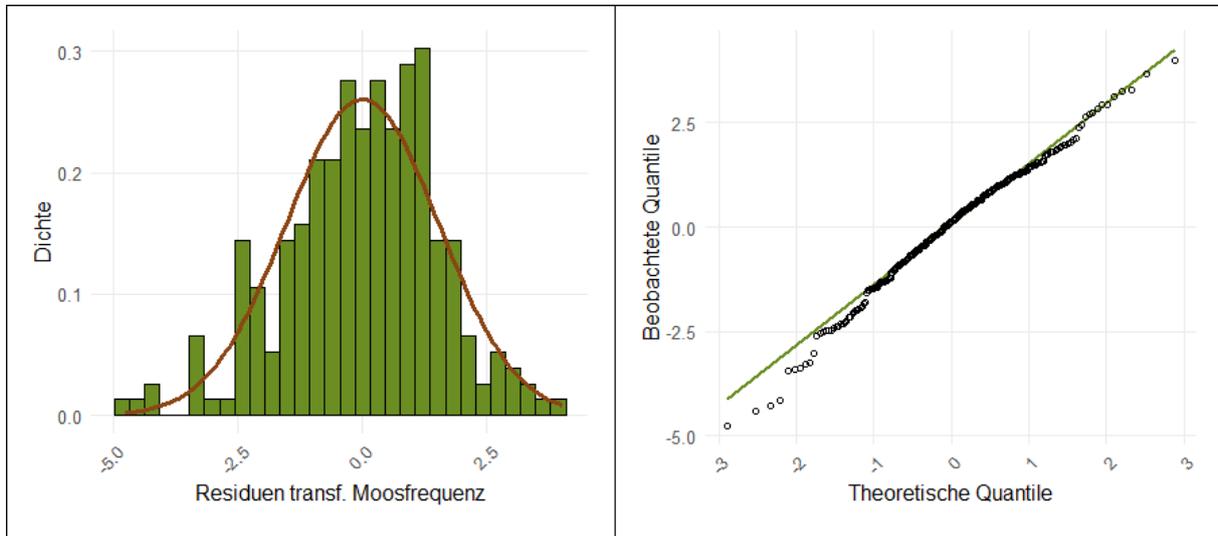


Abbildung 10: Links: Residuen-Verteilung der transformierten Vermoosungsvariable Moosfrequenz mit einem Bin von 30 und einer Normalverteilungskurve (braun). Rechts: Darstellung der Wahrscheinlichkeitsdichte der transformierten Vermoosungsvariable Moosfrequenz mit Normalverteilungskurve (grün).

3.1.3 Zusammenhang der beiden Vermoosungsvariablen

Die korrigierte Spearman-Rangkorrelation sowie das R^2 und der p-Wert wiesen auf eine signifikant positive Korrelation zwischen den beiden Vermoosungsvariablen hin. Mit zunehmender Moosfrequenz stiegen tendenziell auch die Moosquadrate, wobei die überlagerte exponentielle Regression den Trend der Daten gut widerspiegelt (Abbildung 11).

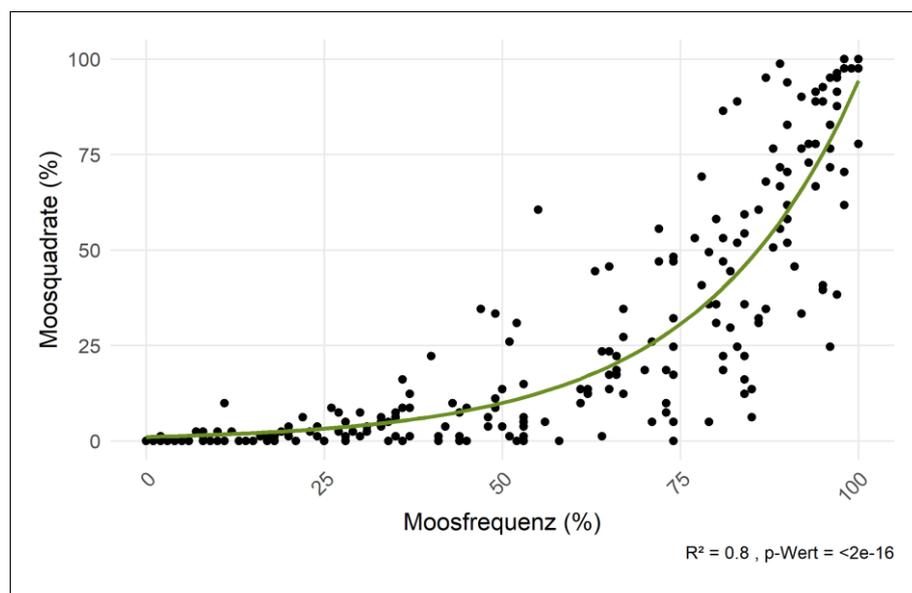


Abbildung 11: Vergleich der beiden Vermoosungsvariablen Moosquadrate und Moosfrequenz mit exponentieller Trendlinie (grün).

3.2 Deskriptive Statistik Definitionsvariablen

3.2.1 Flächen-ID

Zwischen den einzelnen Untersuchungspunkten innerhalb der Flächen waren Unterschiede der Moosdeckung ersichtlich. Gemäss Kruskal-Wallis-Test war sowohl bei Moosquadraten als auch bei Moosfrequenz signifikant, auf welcher Fläche sich der Untersuchungspunkt befand. Die Standardabweichung zwischen den einzelnen Untersuchungspunkten innerhalb derselben Flächen betrug 19.4% bei den Moosquadraten und 21.6% bei der Moosfrequenz.

3.2.2 Gemeldet

Knapp die Hälfte aller Untersuchungsflächen wurde von den Landwirt:innen der UBE als vermoost gemeldet. Die Einschätzung der Landwirt:innen war korrekt. Die als vermoost gemeldeten Flächen wiesen eine statistisch signifikant höhere Moosfrequenz auf (Abbildung 12 rechts). Ein ähnlicher Trend zeigte sich bei den Moosquadraten, wobei hier mehr Ausreisser vorhanden waren (Abbildung 12 links⁸).

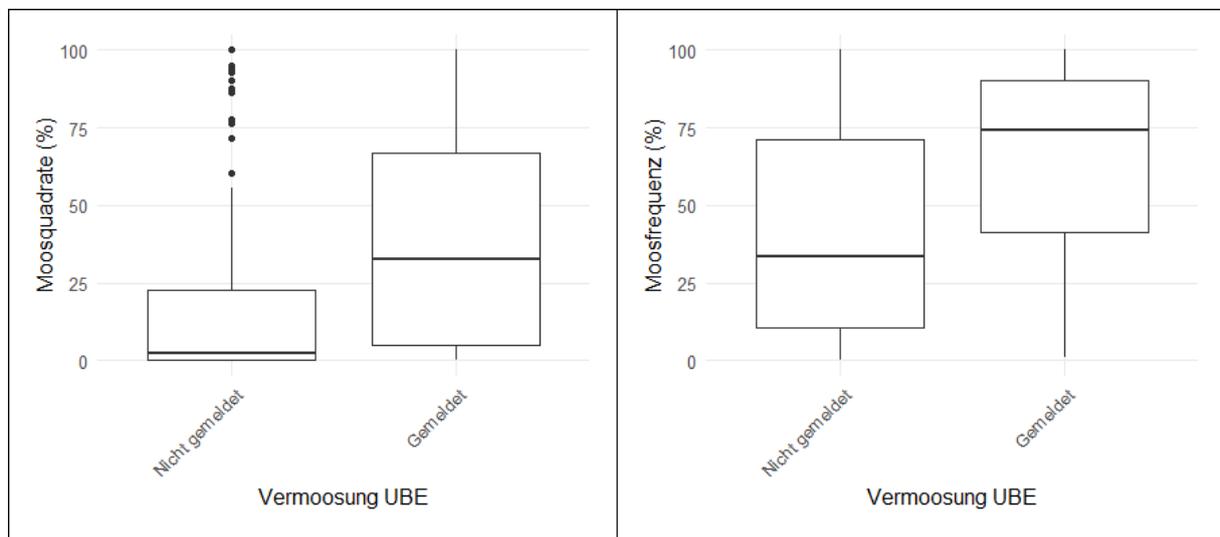


Abbildung 12: Links: Vergleich der Moosquadratrate zwischen der UBE als vermoost gemeldeten und nicht als vermoost gemeldeten Untersuchungspunkten. Rechts: Vergleich der Moosfrequenz zwischen der UBE als vermoost gemeldeten und nicht als vermoost gemeldeten Untersuchungspunkten.

3.2.3 Erhebungsreihenfolge

Die 252 Untersuchungspunkte wurden über einen Zeitraum von drei Wochen untersucht. Gemäss Spearman-Rangkorrelation war keine signifikante Korrelation zwischen der Erhebungsreihenfolge und der Moosfrequenz resp. Moosquadratrate ersichtlich. Die Datenpunkte waren stark verteilt, wobei die Regressionslinie eine leichte Zunahme der Moosfrequenz im Laufe der Feldarbeiten aufzeigte, welche anhand des p-Werts jedoch nur sehr schwach signifikant war (Abbildung 13 links). Das Konfidenzintervall wies eine gewisse Unsicherheit auf, doch der allgemeine Trend blieb bestehen. Bei der Überprüfung der Vegetationshöhe im Verlauf der drei Wochen stellte sich heraus, dass die Vegetationshöhe gegen Ende der Feldarbeit abnahm (Abbildung 13 rechts). Dieser Trend war nicht signifikant.

⁸ In den weiteren Unterkapiteln der deskriptiven Statistik werden die Abbildungen zu Moosquadratrate weggelassen. Abweichungen vom Trend der Moosfrequenz werden jedoch erläutert. Die entsprechenden Abbildungen sind in Anhang B einsehbar.

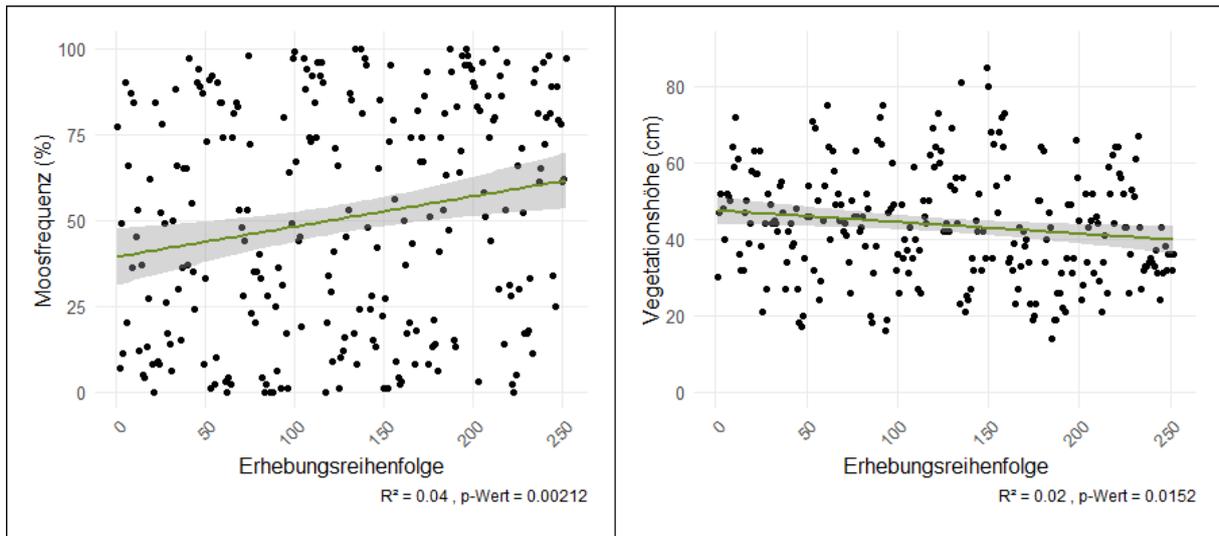


Abbildung 13: Links: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit der Erhebungsreihenfolge (95%-Konfidenzintervall in grau). Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Vegetationshöhe in cm mit der Erhebungsreihenfolge (95%-Konfidenzintervall in grau).

3.3 Deskriptive Statistik Bewirtschaftungsvariablen

3.3.1 Kulturtyp

Gemäss Mann-Whitney-U-Test bestand eine positive Korrelation zwischen der Moosfrequenz und der Extensivierung von Wiesen. Dabei lag der Median der Moosfrequenz bei EW rund doppelt so hoch wie bei WiW (Abbildung 14 links). Dieser Trend von erhöhter Moosdeckung bei extensiveren Wiesen war auch bei der Variable Moosquadrate ersichtlich, wobei dort die Streuung der Werte geringer war. Betrachtet man die vertikale Verteilung der Kulturtypen fiel auf, dass WiW vermehrt in höheren Lagen auftreten (Abbildung 14 rechts). Dieser Zusammenhang war statistisch signifikant, wobei nur 13 WiW untersucht wurden. Der Trend wurde zusätzlich über alle BFF und NHGF der UBE überprüft und konnte bestätigt werden (Anhang B2).

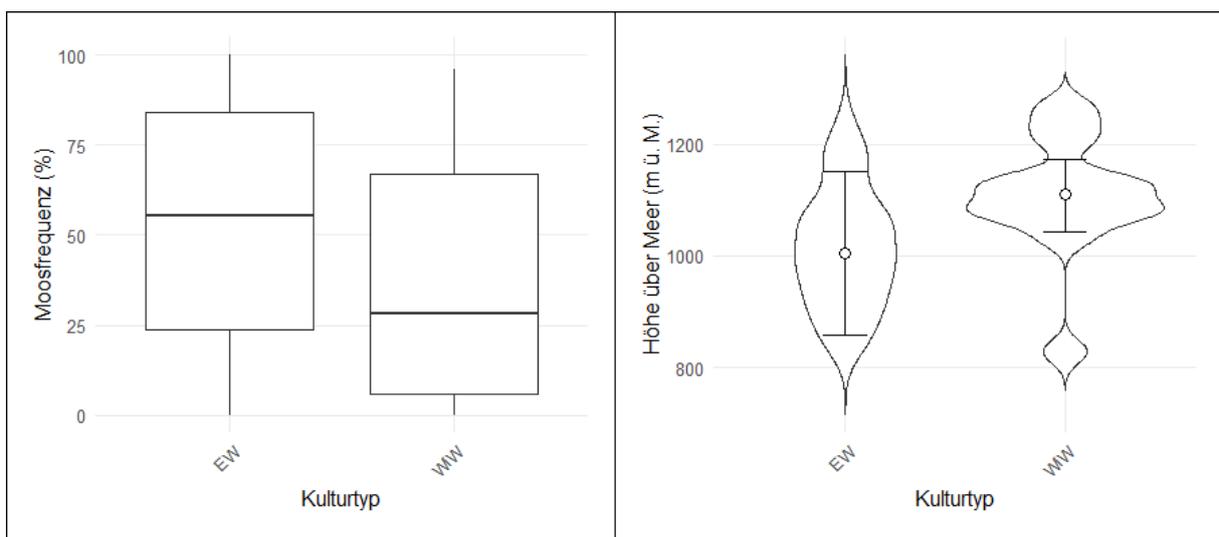


Abbildung 14: Links: Vergleich der Moosfrequenz auf EW und WiW mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers. Rechts: Verteilung der EW und WiW über die Höhe über Meer (m ü. M.) mit Median und Interquartilsabstand.

3.3.2 Höhenzone

Es wurden ausschliesslich die beiden Höhenzonen BZ2 und BZ3 betrachtet. Diese sind nicht nur häufig im Entlebuch, sondern unterscheiden sich auch im Schnittzeitpunkt – BZ2 am 1. Juli und BZ3 am 15. Juli (T. Walter et al., 2007). Die Moosdeckung war in BZ3 leicht höher als in BZ2 (Abbildung 15). Dieser Trend war nur bei der Moosfrequenz statistisch leicht signifikant. Bei den Moosquadraten erwies er sich als nicht signifikant. In beiden Höhenzonen war die Moosdeckung stark variabel.

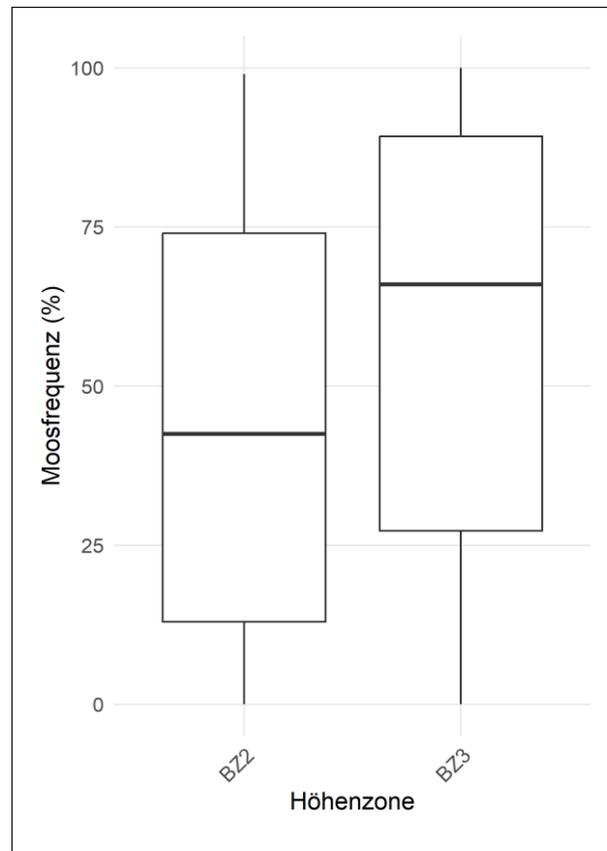


Abbildung 15: Vergleich der Moosfrequenz je Höhenzone resp. Schnittzeitpunkt mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers.

3.3.3 Schnittregime

Wie durch den Kruskal-Wallis-Test überprüft, bestand kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Schnittregimen Flex und Standard (Abbildung 16 links). Hingegen zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen NHGF und Nicht-NHGF. In der UBE unterliegen viele NHGF dem Moorschutz und gelten als feuchte Standorte. Betrachtete man die NHGF genauer, ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Ebenen der NHG-Verträge (Abbildung 16 rechts). Dieselben Erkenntnisse gelten auch für die Variable Moosquadrate.

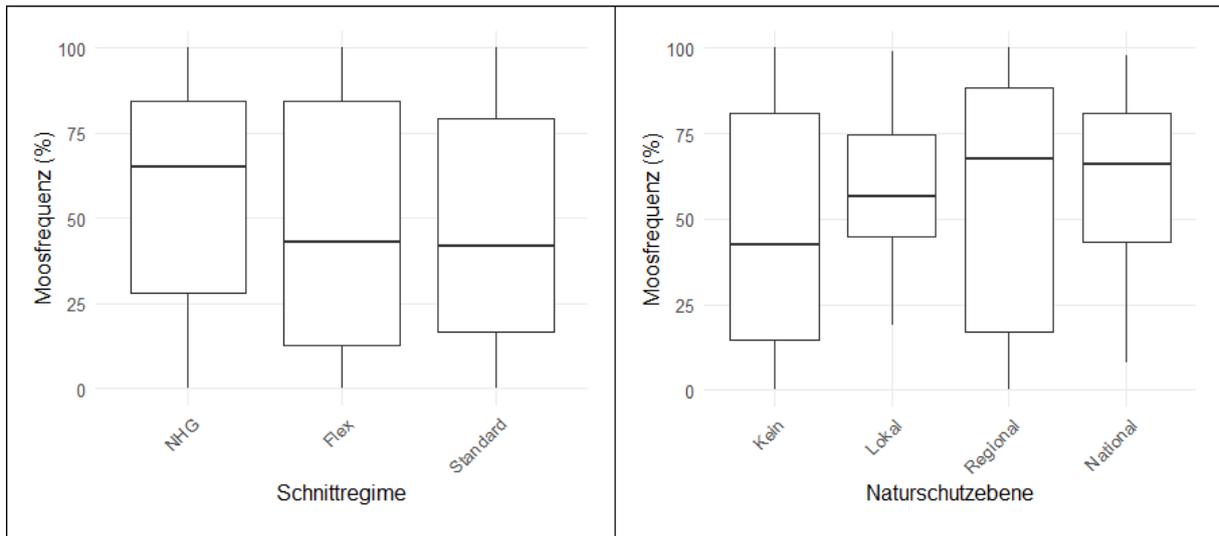


Abbildung 16: Links: Vergleich der Moosfrequenz je untersuchtes Schnittregime mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers. Rechts: Vergleich der Moosfrequenz je NHG-Ebene mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers.

3.3.4 Qualitätsstufe

Gemäss Benz et al. (2018) weisen BFF mit Q2 eine höhere Anzahl Zeigerpflanzen auf, wobei Q2-Flächen nährstoffarme und ökologisch wertvolle Flächen identifizieren. In den Daten wurde keine signifikante Korrelation zwischen der Qualitätsstufe und der Moosdeckung gefunden (Abbildung 17 links). Der Median sowie die Streuung waren bei beiden Qualitätsstufen nahezu identisch. Zur Verifizierung der Daten wurde überprüft, ob bei Q2-Flächen tatsächlich mehr Zeigerpflanzen gefunden wurden. Entsprechend den Erwartungen wurden während den Feldarbeiten auf Q2-Flächen mehr Zeigerpflanzen gezählt (Abbildung 17 rechts).

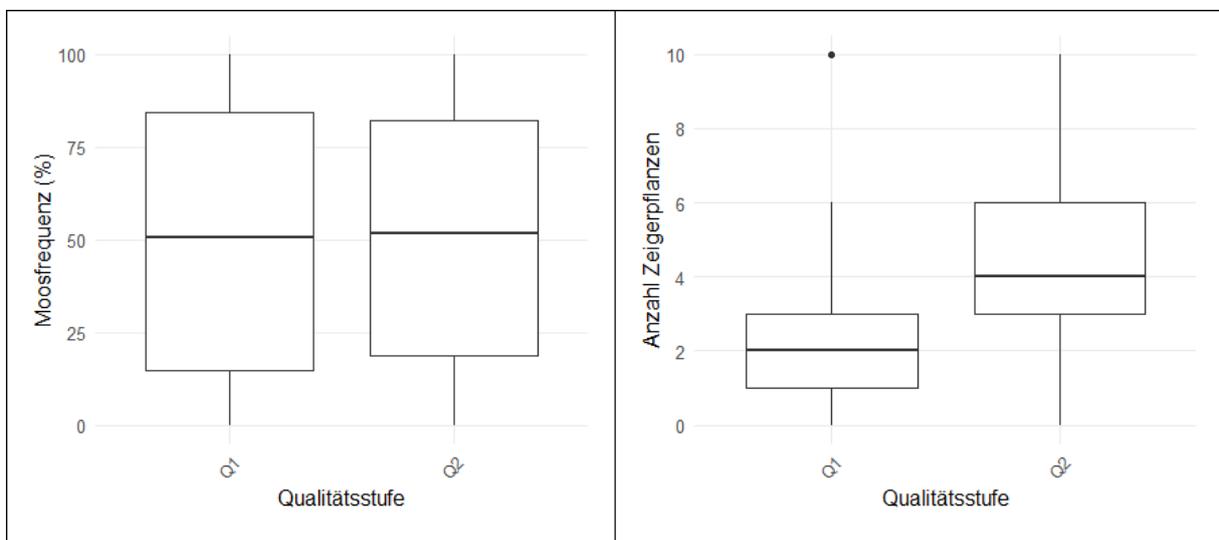


Abbildung 17: Links: Vergleich der Moosfrequenz je Qualitätsstufe mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers. Rechts: Vergleich der Anzahl Zeigerpflanzen je Qualitätsstufe mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers.

3.3.5 Anzahl Zeigerpflanzen

Gemäss Spearman-Rangkorrelation bestand keine signifikante Korrelation zwischen der Moosfrequenz und der Anzahl der Zeigerpflanzen (Abbildung 18 links), ähnlich wie bei der stark zusammenhängenden Variable Qualitätsstufe (siehe 3.3.4). Meist wurden zwischen null und acht Zeigerpflanzen je Untersuchungspunkt gefunden, wobei nur an zwei Standorten mehr Zeigerpflanzen entdeckt wurden. Ein

ähnlicher Zusammenhang konnte zwischen Moosquadrate und Anzahl Zeigerpflanzen beobachtet werden, wobei die durchschnittlichen Moosquadrate je Anzahl Zeigerwerte tiefer lag. Ein Vergleich der Anzahl Zeigerpflanzen je Kulturtyp zeigte, dass beide Kulturtypen eine ähnliche Anzahl an Zeigerpflanzen aufwiesen, wobei der Median bei WiW leicht höher lag (Abbildung 18 rechts). Es bestand kein signifikanter Unterschied in den Anzahl Zeigerpflanzen zwischen den beiden Kulturtypen.

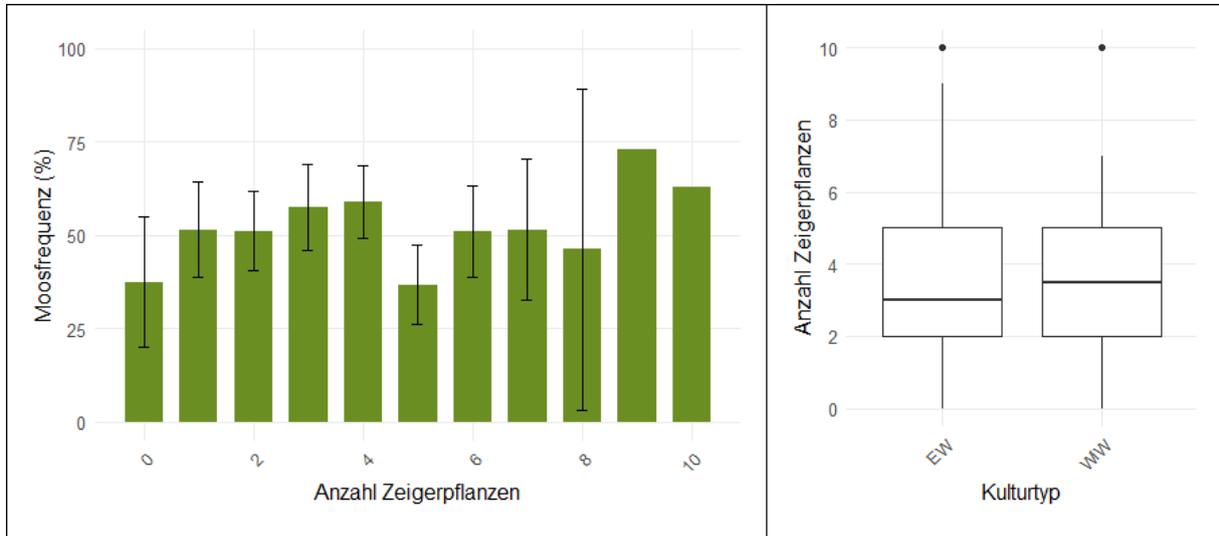


Abbildung 18: Links: Durchschnittliche Moosfrequenz je Anzahl Zeigerpflanzen mit Konfidenzintervall (schwarz) bei mehreren Datenpunkten. Rechts: Vergleich der Anzahl Zeigerpflanzen je nach Kulturtyp mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers.

3.3.6 Alter BFF

Es wurde kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Moosfrequenz und dem Alter der BFF gefunden (Abbildung 19 links). Die Moosfrequenz schwankte stark je nach Alter der BFF, wobei das Konfidenzintervall und der p-Wert gross und das R^2 klein war. Eine ähnliche Beobachtung wurde bei Moosquadrate gemacht. Auch zwischen dem Alter der BFF und deren Anzahl Zeigerpflanzen wurde kein signifikanter Zusammenhang gefunden (Abbildung 19 rechts). Das Alter der BFF resp. der Beginn der Verpflichtungsdauer wird bei gewissen Anpassungen auf das aktuelle Jahr aktualisiert und repräsentiert daher nicht immer das absolute Alter der Fläche.

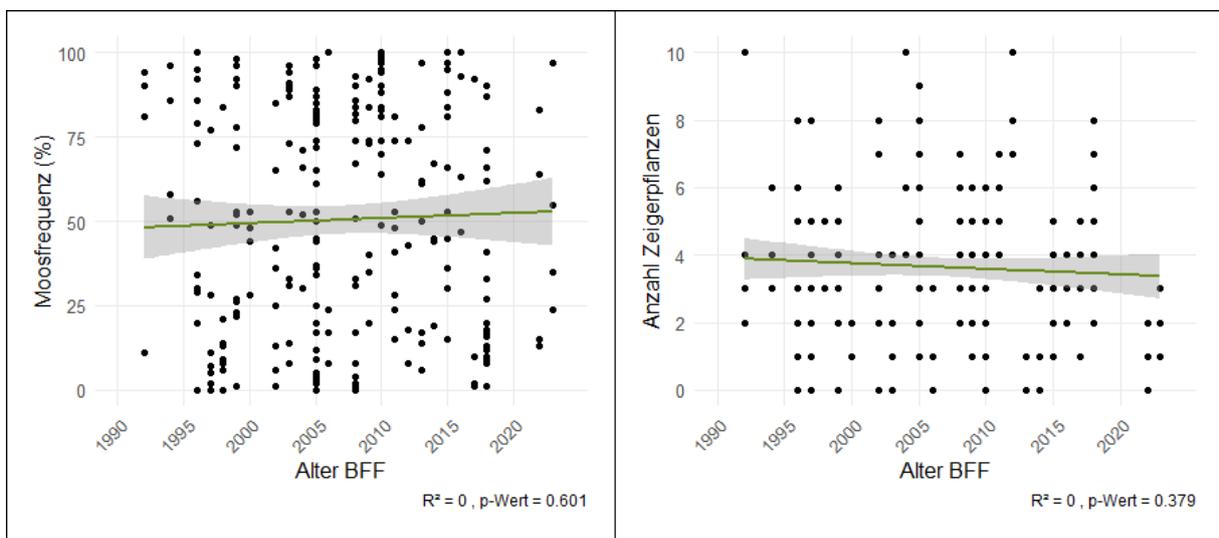


Abbildung 19: Links: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit dem Alter der BFF (95%-Konfidenzintervall in grau). Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Anzahl Zeigerpflanzen mit dem Alter der BFF (95%-Konfidenzintervall in grau).

3.3.7 Fläche BFF

Es zeigte sich ein gemäss p-Wert nicht signifikanter, leicht positiver Trend zwischen der Moosfrequenz und der Fläche der BFF (Abbildung 20), wobei die Moosfrequenz bei grösseren Flächen höher war. Das Konfidenzintervall vermittelte bei grösseren Flächen eine höhere Unsicherheit aufgrund der schlechteren Datenlage. Auch bei Moosquadrate war ein ähnlicher, nicht signifikanter Trend erkennbar. Bei näherer Betrachtung der Flächengrösse fiel auf, dass insbesondere grössere Flächen einem NHG-Vertrag unterliegen.

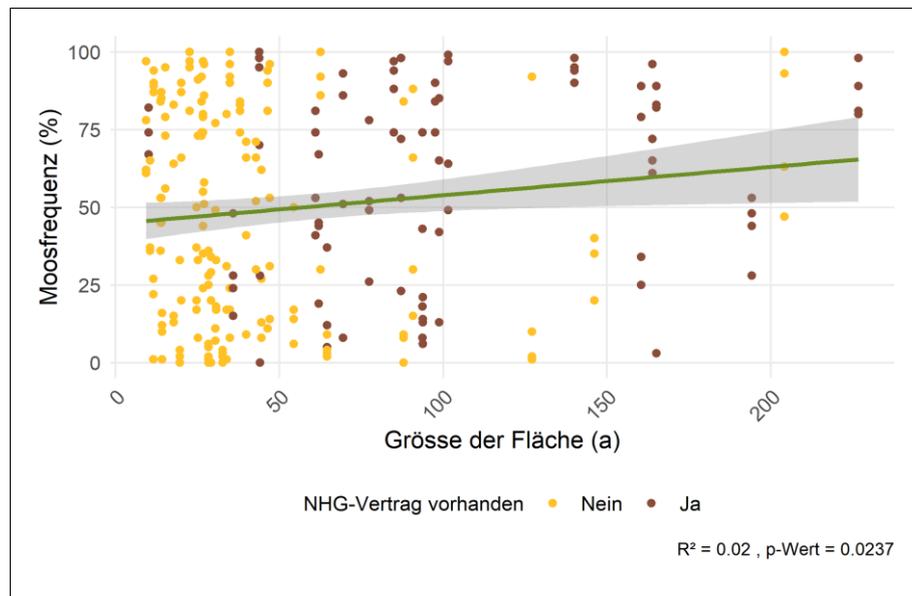


Abbildung 20: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit der Grösse der BFF in Aren, wobei die Punkte farblich nach NHGF (braun) und Nicht-NHGF (gelb) gruppiert sind (95%-Konfidenzintervall in grau).

3.4 Deskriptive Statistik Umweltvariablen

3.4.1 Exposition

Es war klar ersichtlich, dass in südlich ausgerichteten Standorten die Moosfrequenz am niedrigsten war, in östlich und westlich ausgerichteten Standorten mittelmässig und in nördlich ausgerichteten Standorten am höchsten (Abbildung 21 links). Die Streuung war jedoch in allen Kategorien breit und auch an südlich ausgerichteten Standorten gab es einzelne Ausreisser mit hoher Moosfrequenz. Der Trend zwischen Exposition und Moosfrequenz wurde durch den Kruskal-Wallis-Test bestätigt und konnte auch bei den Moosquadraten beobachtet werden. Der Vergleich der Sonneneinstrahlung mit der Exposition zeigte eine signifikant unterschiedliche Verteilung der Sonneneinstrahlung je nach Exposition (Abbildung 21 rechts).

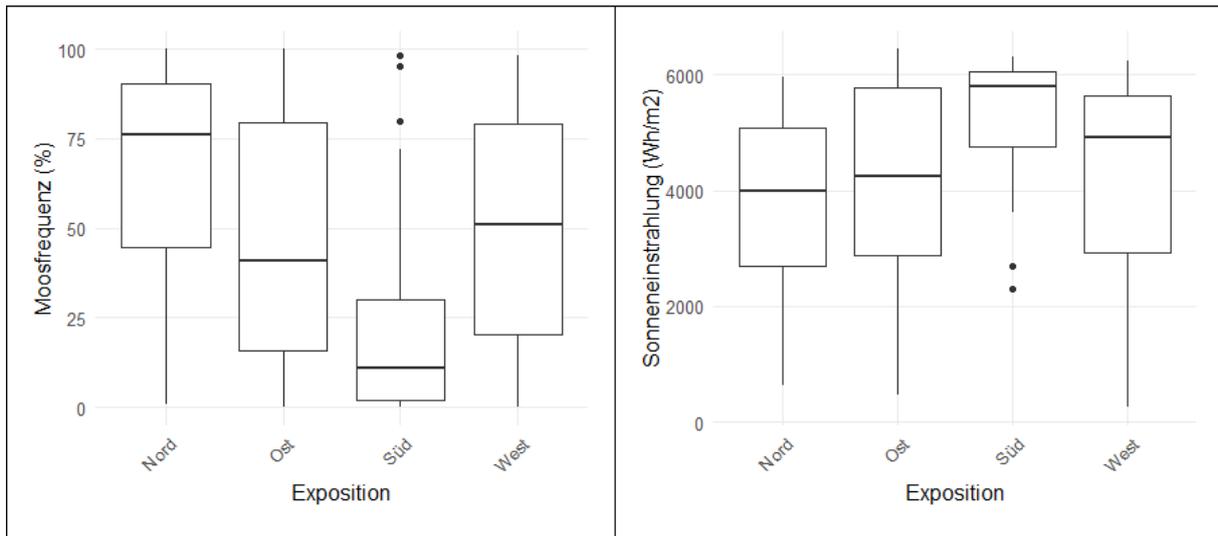


Abbildung 21: Links: Vergleich der Moosfrequenz je nach Exposition mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers. Rechts: Vergleich der Sonneneinstrahlung in Wh/m² je nach Exposition mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers.

3.4.2 Hangneigung

Es wurden Untersuchungspunkte mit einem Gefälle zwischen 1° und 63° betrachtet, wobei durchschnittlich eine Hangneigung von 19° vorlag (Abbildung 22). Es war bei beiden Vermoosungsvariablen keine signifikante Korrelation erkennbar, was durch das R^2 von null verdeutlicht wird. Das Konfidenzintervall war insbesondere in den steileren und sehr flachen Lagen relativ gross, da die meisten Messungen bei einer Hangneigung von 5° bis 30° vorgenommen wurden.

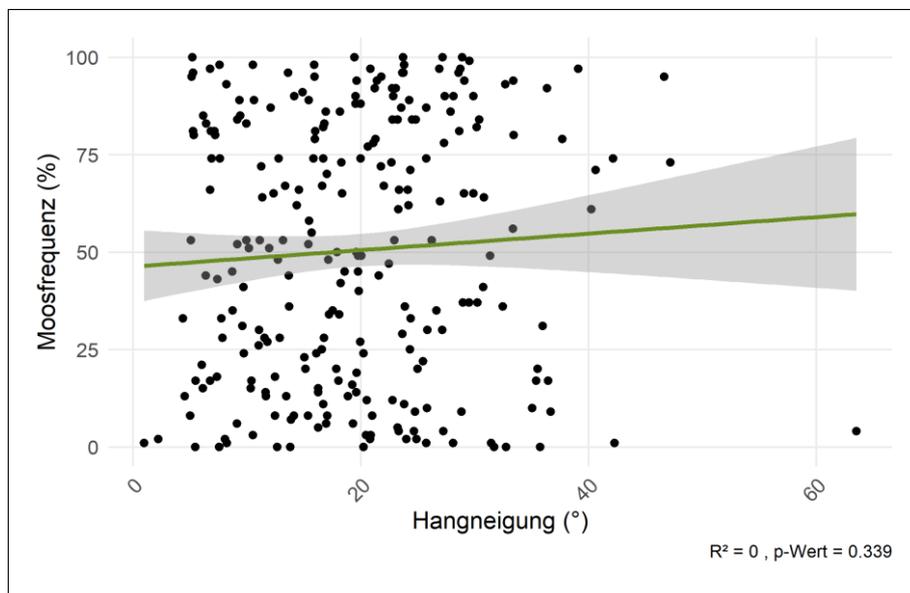


Abbildung 22: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit der Hangneigung in Grad (95%-Konfidenzintervall in grau).

3.4.3 Höhe über Meer

Die Datenpunkte zeigten keinen Zusammenhang zwischen Moosfrequenz und Höhe über Meer (Abbildung 23 links). Die Streuung war gross und die Spearman-Rangkorrelation erkannte keine signifikante Korrelation. Das R^2 lag nahezu bei null und der p-Wert deutet auch auf keine signifikante Korrelation hin. Zwischen Moosquadrate und Höhe über Meer wurde ebenfalls keine signifikante Korrelation gefunden.

Im Gegensatz dazu zeigte die Verteilung der NHGF mit der Höhe einen statistisch signifikanten Zusammenhang: NHGF liegen vermehrt in höheren Lagen (Abbildung 23 rechts).

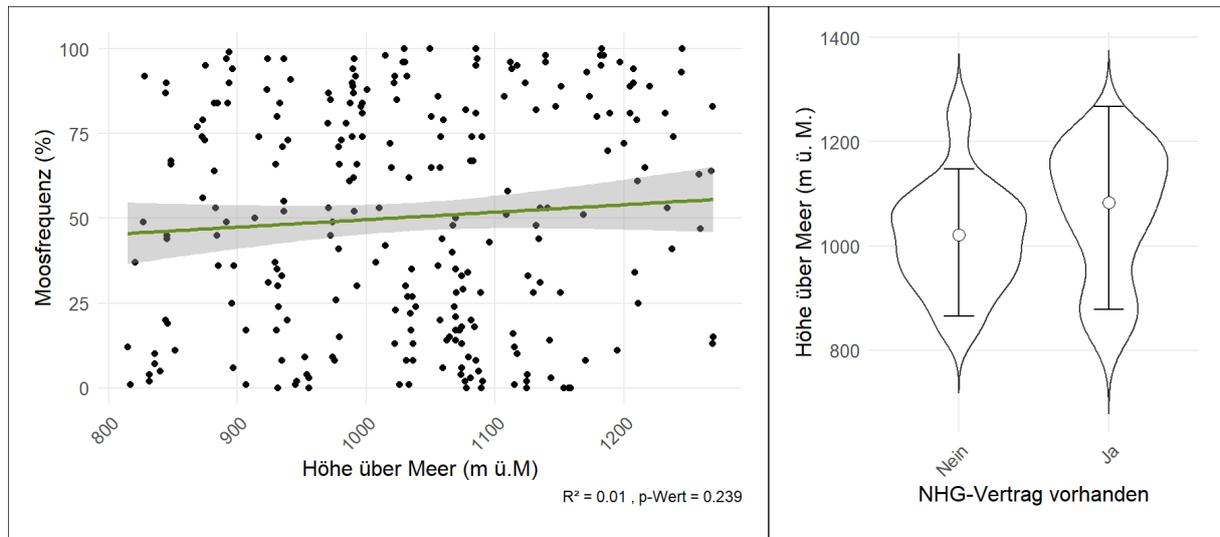


Abbildung 23: Links: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit der Höhe über Meer (95%-Konfidenzintervall in grau). Rechts: Vergleich der Höhe über Meer von NHGF und Nicht-NHGF mit Median und Interquartilsabstand.

3.4.4 Geländemorphologie

Über alle Geländemorphologie-Kategorien hinweg war gemäss Kruskal-Wallis-Test keine statistisch signifikante Korrelation vorhanden (Abbildung 24). Auch wenn man exklusiv die drei Hangbereiche betrachtete, waren keine statistisch signifikanten Unterschiede ersichtlich. Bei Betrachtung der beiden Kategorien Mulde und Kuppe fiel auf, dass der Median der Moosfrequenz in der Kategorie Mulde niedriger war, jedoch statistisch nicht signifikant. Dieselben Beobachtungen konnten bei der Variable Moosquadrate gemacht werden, wobei zusätzlich die Geländemorphologie-Kategorie Flach niedrige Moosquadrate aufwies, jedoch mit einer hohen Streuung.

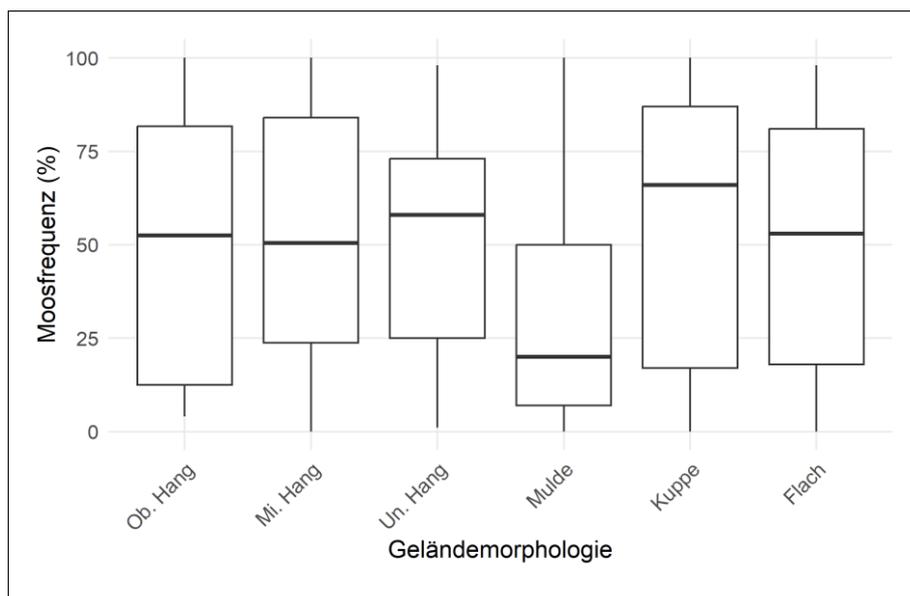


Abbildung 24: Vergleich der Moosfrequenz mit den unterschiedlichen Geländemorphologie-Kategorien mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers.

3.4.5 Sonneneinstrahlung

Die analysierten Standorte wiesen eine Sonneneinstrahlung von 251 Wh/m² bis 6443 Wh/m² auf. Es zeigte sich ein negativer Zusammenhang zwischen der Moosfrequenz und der Sonneneinstrahlung, gemessen in Wh/m² (Abbildung 25). Diese Beobachtung stimmt mit den Ergebnissen der Variable Exposition in 3.4.1 überein. Höhere Werte der Sonneneinstrahlung führten zu einer Verringerung der Moosfrequenz. Aufgrund der geringen Anzahl untersuchter Standorte mit weniger als 2000 Wh/m² Sonneneinstrahlung war das Konfidenzintervall in diesem Bereich grösser. Der festgestellte Trend war sowohl bei den Moosquadraten als auch bei der Moosfrequenz statistisch signifikant, obwohl das R² klein war.

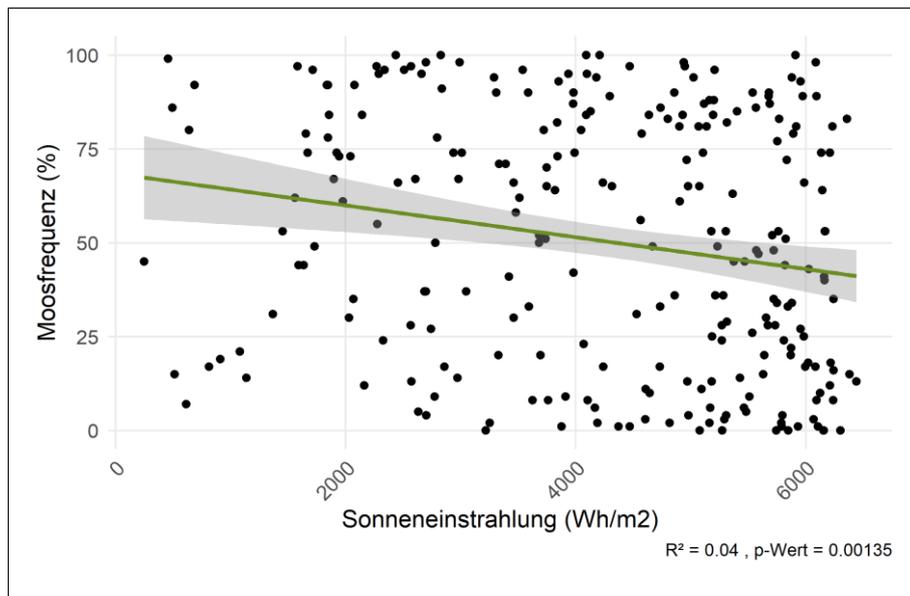


Abbildung 25: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit der Sonneneinstrahlung in Wh/m² (95%-Konfidenzintervall in grau).

3.4.6 NDVI

Die NDVI-Werte variierten zwischen 0.448 und 0.853, was auf eine moderate Vegetationsdeckung hinweist, die typisch für landwirtschaftliche Flächen oder Wald ist (Granados-Ramírez et al., 2004). Die Werte der Untersuchungspunkte waren über das gesamte Spektrum verteilt und zeigten keine klaren Trends (Abbildung 26). Die Streuung war gross und gemäss Spearman-Rangkorrelation und p-Wert war weder bei der Moosfrequenz noch bei den Moosquadraten eine signifikante Korrelation vorhanden.

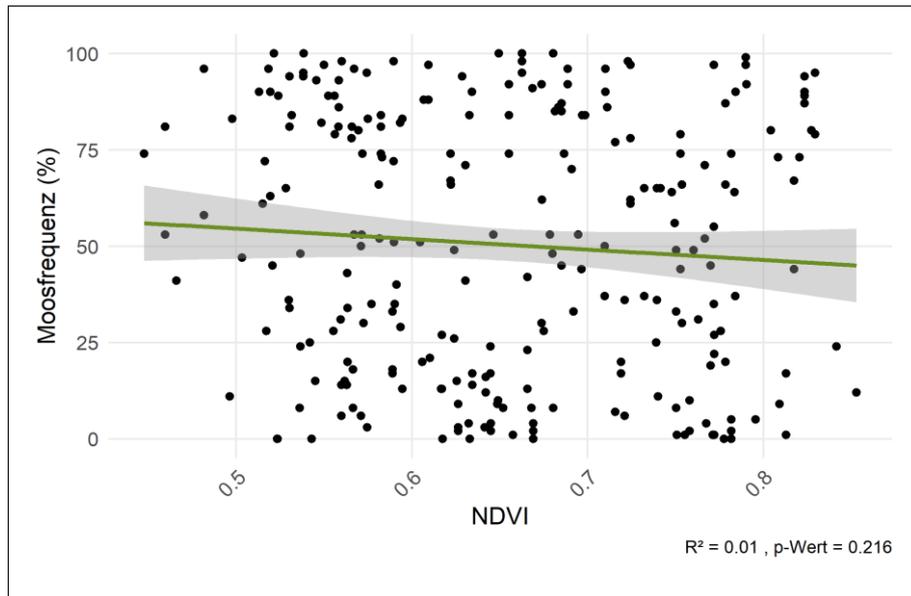


Abbildung 26: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit dem NDVI aus dem Jahr 2018 (95%-Konfidenzintervall in grau).

3.4.7 Bodenfrequenz

Durch die Variable Bodenfrequenz konnte gemessen werden, wie dicht die Vegetation der Moose und höheren Pflanzen ist. 232 der 252 Untersuchungspunkte wiesen eine Bodenfrequenz von null auf. Daher wurden für die Analyse die Untersuchungspunkte inkl. und exkl. Null-Werte betrachtet (Abbildung 27). Aufgrund der hohen Häufigkeit von Null-Werten erwies sich eine Regressionslinie in Abbildung 27 links nicht als sinnvoll und rechts wurde auf das Konfidenzintervall verzichtet. Allgemein war kein klarer Trend ersichtlich und es bestand keine signifikante Korrelation zwischen Bodenfrequenz und Moosfrequenz. Vergleicht man die Variable Moosquadrate mit der Bodenfrequenz, konnten dieselben Schlussfolgerungen gezogen werden. Auch bei einem Vergleich der Bodenfrequenz mit den beiden Kulturtypen EW und WiW, konnte kein signifikanter Unterschied in der Bodenfrequenz zwischen den Kulturtypen festgestellt werden.

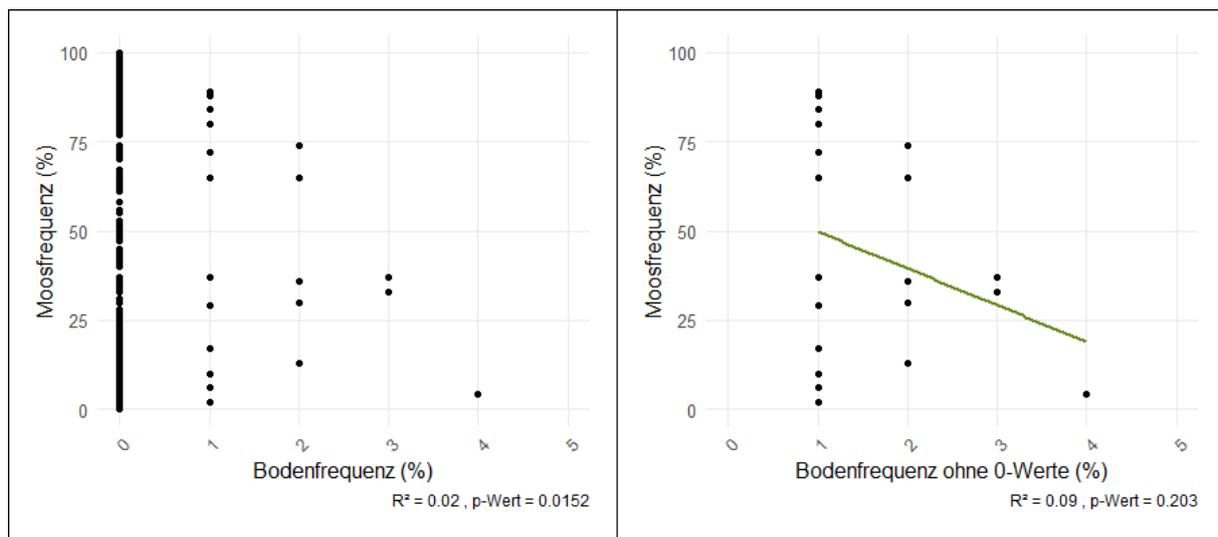


Abbildung 27: Links: Vergleich der Moosfrequenz mit der Bodenfrequenz. Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit der Bodenfrequenz ohne den Untersuchungspunkten mit einer Bodenfrequenz von null.

3.4.8 Pflanzenfrequenz

Anhand der Pflanzenfrequenz konnte die Dichte der höheren Pflanzen in der Vegetation ermittelt werden. 234 der 252 Untersuchungspunkte wiesen eine Pflanzenfrequenz von 100 auf. Daher wurden die Analysen sowohl inkl. als auch exkl. der Untersuchungspunkte mit einer Pflanzenfrequenz von 100 durchgeführt. Aufgrund der hohen Häufigkeit einer Pflanzenfrequenz von 100 erwies sich eine Regressionslinie in Abbildung 28 links sowie ein Konfidenzintervall rechts nicht als sinnvoll. Bei Berücksichtigung aller Werte zeigte sich gemäss der Spearman-Rangkorrelation bei beiden Vermoosungsvariablen eine signifikant negative Korrelation (Abbildung 28). Exkl. Der 100er-Werte war hingegen nur der Zusammenhang mit den Moosquadraten signifikant. Diese Signifikanz konnte nicht durch den p-Wert der linearen Regression bestätigt werden. Vergleich man die Pflanzenfrequenz zwischen EW und WiW, konnte kein signifikanter Unterschied in der Pflanzenfrequenz je Kulturtyp festgestellt werden.

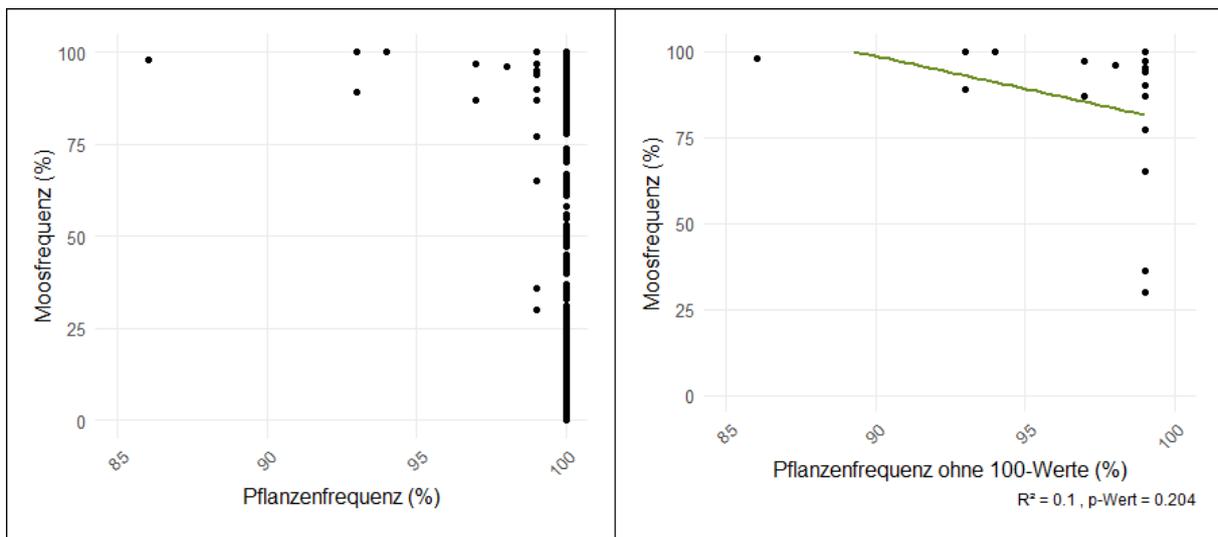


Abbildung 28: Links: Vergleich der Moosfrequenz mit der Pflanzenfrequenz. Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosfrequenz mit der Pflanzenfrequenz ohne der Untersuchungspunkte mit einer Pflanzenfrequenz von 100.

3.4.9 Vegetationshöhe

Vergleich man die Moosquadrate mit der Vegetationshöhe, wurde ersichtlich, dass die Moosquadrate mit steigender Vegetationshöhe abnahmen. Dieser Trend war analog zwischen Moosfrequenz und Vegetationshöhe zu beobachten (Abbildung 29 links). Gemäss Spearman-Rangkorrelation und p-Wert war die Korrelation zwischen Vegetationshöhe und Moosfrequenz resp. Moosquadrate signifikant. Es wurden Vegetationshöhen zwischen 14 cm und 85 cm gemessen, wobei das Konfidenzintervall bei tiefer sowie hoher Vegetationshöhe grösser war. Die Vegetationshöhe ist ein indirektes Mass für den Ertrag, da intensivere Wiesen zu diesem Zeitpunkt im Jahr meist bereits eine höhere und üppigere Vegetation aufwiesen (Boch et al., 2018). Dies konnte in den Daten nicht bestätigt werden, da die leicht erhöhte Vegetationshöhe auf WiW statistisch nicht signifikant war (Abbildung 29 rechts). Hingegen wurde auf NHGF eine tiefere Vegetationshöhe als auf Nicht-NHGF beobachtet. Dieser Zusammenhang galt gemäss Kruskal-Wallis-Test als statistisch signifikant. Die NHGF-Wiesen wurden im Vgl. zu anderen BFF-Wiesen nicht immer zum selben Zeitpunkt und mit demselben Schnittregime bewirtschaftet. Ein vermeintlicher Unterschied der Vegetationshöhe je nach Schnittregime (Anhang B1) galt jedoch nicht als statistisch signifikant.

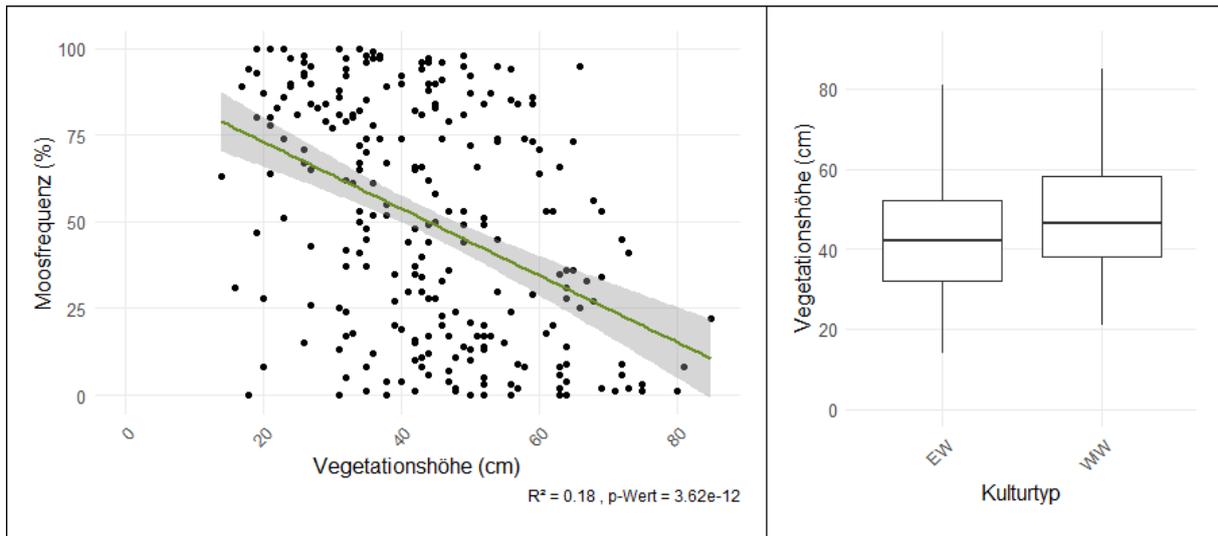


Abbildung 29: Links: Vergleich und linearer Trend der Moosfrequenz mit der Vegetationshöhe in cm (95%-Konfidenzintervall in grau). Rechts: Vergleich der Vegetationshöhe in cm mit den Kulturtypen EW und WiW mit Median, Interquartilsabstand und Whiskers.

3.5 Modelle

3.5.1 Teilmodelle Bewirtschaftung

Nach der Evaluation der besten Modelle stellte sich für die Analyse der Variable Moosquadrate ein Modell mit den Variablen Kulturtyp, Alter BFF, Schnittregime, Höhenzone, Anzahl Zeigerpflanzen, Qualitätsstufe sowie dem Random-Effekt der Flächen-ID als beste Variante heraus (Tabelle 3). Das beste Modell für die Moosfrequenz beinhaltete fast dieselben Variablen wie das Modell für Moosquadrate, jedoch ohne Anzahl Zeigerpflanzen (Tabelle 4). Betrachtete man die Modellgüte, konnte das Modell der Moosfrequenz die beobachteten Werte besser erklären. Das Modell für Moosquadrate verfügte über ein REML von 1191.0, einem marginalen R^2 von 0.106 sowie einem konditionalen R^2 von 0.514. Im Gegensatz dazu verfügte das Moosfrequenz-Modell über einen REML von 1473.3, einem marginalen R^2 von 0.110 und einem konditionalen R^2 von 0.553. Es wurden also beim Moosquadrat-Modell 10.6% der Varianz durch feste Effekte und 51.4% durch feste und zufällige Effekte erklärt, während es beim Moosfrequenz-Modell 11.0% und 55.3% waren. Tendenziell wurden in beiden Modellen die gemessenen Werte mit einer gewissen Unsicherheit vorhergesagt, wobei jedoch v. a. bei der Moosfrequenz die tieferen Werte im Modell im Vergleich zur Realität eher überschätzt, und höhere Werte unterschätzt wurden (Anhang C1).

Vergleich man die Modelloutputs, stellten sich in beiden Modellen der Intercept sowie der Kulturtyp als statistisch signifikant heraus. Ohne Einfluss der anderen Variablen (Intercept) lag die Anzahl der Moosquadrate bei 4.299 (Tabelle 3) und die Moosfrequenz bei 12.678 (Tabelle 4). Nach Rücktransformation würde dies bei Moosquadrate eine Moosdeckung von 22.8% und bei Moosfrequenz eine Moosdeckung von 56.5% ergeben. Der Kulturtyp war beim Moosquadrat-Modell signifikanter, verfügte aber über einen weniger negativen Estimate. In beiden Modellen wurde suggeriert, dass auf WiW eine geringere Moosdeckung vorhanden war als auf EW. Weiter war im Moosfrequenz-Modell die Höhenzone signifikant, wobei in der BZ3 eine signifikant höhere Moosfrequenz vorhanden war als in der BZ2. Grundsätzlich gingen die Trends der einzelnen Variablen in beiden Modellen in dieselbe Richtung und es gab keine weiteren signifikanten Abweichungen zwischen den Modellen. Die Varianzkomponente der Flächen-ID betrug beim Moosquadrat-Modell 4.011 resp. beim Moosfrequenz-Modell 16.940, wobei die Residual-Varianz beim Moosquadrat-Modell bei 4.771 und beim Moosfrequenz-Modell bei 17.120 lag.

Dementsprechend war in beiden Fällen sowohl der unterschied innerhalb der Flächen als auch zwischen den Flächen signifikant.

Tabelle 3: Output der festen Effekte des LMM von Moosquadrate mit den Bewirtschaftungsvariablen, wobei ein t-Wert von ± 1.96 als signifikant ($ < 0.05$), $+2.58$ als hoch signifikant ($** < 0.01$) und ± 3.29 als extrem signifikant ($*** < 0.001$) gilt.*

Feste Effekte	Estimate	Standardabweichung	t-Wert
Intercept	4.299	0.902	4.77 ***
Kulturtyp – WiW	-2.105	0.787	-2.67 **
Alter BFF	0.018	0.301	0.06
Schnitt/NHG – Flex	-1.371	0.883	-1.55
Schnitt/NHG – Standard	-0.644	0.743	-0.87
Höhenzone – BZ3	0.961	0.587	1.64
Anzahl Zeigerpflanzen	0.204	0.209	0.98
Qualitätsstufe – Q2	-0.658	0.713	-0.92

Tabelle 4: Output der festen Effekte des LMM von Moosfrequenz mit den Bewirtschaftungsvariablen, wobei ein t-Wert von ± 1.96 als signifikant ($ < 0.05$), $+2.58$ als hoch signifikant ($** < 0.01$) und ± 3.29 als extrem signifikant ($*** < 0.001$) gilt.*

Feste Effekte	Estimate	Standardabweichung	t-Wert
Intercept	12.678	1.680	7.55 ***
Kulturtyp – WiW	-3.397	1.473	-2.31 *
Alter BFF	0.165	0.563	0.29
Schnitt/NHG – Flex	-2.705	1.643	-1.65
Schnitt/NHG – Standard	-1.668	1.390	-1.20
Höhenzone – BZ3	2.297	1.095	2.10 *
Qualitätsstufe – Q2	-1.097	1.300	-0.84

3.5.2 Teilmodelle Umwelt

Es stellte sich für Moosquadrate ein Modell mit Exposition, Geländemorphologie, Pflanzenfrequenz, Vegetationshöhe, Höhe über Meer, Sonneneinstrahlung und der Flächen-ID als Random-Effekt als bestes Modell heraus (Tabelle 5). Das beste Moosfrequenz-Modell verzichtete zusätzlich auf die Variable Pflanzenfrequenz (Tabelle 6). Das REML des Moosquadrat-Modells lag bei 1109.1 und jenes des Moosfrequenz-Modells bei 1395.1. Weiter verfügte das Moosquadrat-Modell über ein marginales R^2 von 0.358. Das Moosfrequenz-Modell verfügte über ein tieferes marginales R^2 mit 0.322, was bedeutet, dass das Moosquadrat-Modell nur anhand der festen Effekte die Varianz der Werte besser erklären konnte. Das konditionale R^2 war wiederum beim Moosfrequenz-Modell höher mit einem Wert von 0.618 im Vergleich zu 0.591 beim Moosquadrat-Modell. Grundsätzlich verfügten beide Modelle über eine ausreichende Modellgüte, um die Moosdeckung mit einer gewissen Unsicherheit vorherzusagen. Dabei wurden die tiefen vorhergesagten Werte v. a. im Modell der Moosfrequenz etwas überschätzt und die hohen Werte etwas unterschätzt (Anhang C1).

Betrachtet man den Output der beiden Modelle, sind in beiden der Intercept, Exposition, Geländemorphologie Mulde sowie die Vegetationshöhe statistisch signifikant. Ohne Einfluss der anderen Variablen (Intercept) lag die Moosquadrate bei 4.389 (Tabelle 5) und die Moosfrequenz bei 12.732 (Tabelle 6). Nach Rücktransformation bedeutete dies für Moosquadrate eine Moosdeckung von 23.5% und bei

Moosfrequenz von 56.9%. Die Exposition war in jeder Kategorie signifikant, jedoch stellte sich dieser Trend beim Moosfrequenz-Modell als signifikanter heraus. Der allgemeine Trend besagte in beiden Modellen, dass südlich, östlich und westlich ausgerichtete Standorte eine geringere Moosdeckung aufwiesen als nördlich ausgerichtete Standorte. Die Geländemorphologie Mulde galt in beiden Fällen als signifikant und wies eine geringere Moosdeckung auf als die Referenzkategorie Oberer Hangbereich. Auch die Vegetationshöhe war in beiden Modellen signifikant. Gemäss Trend sank die Moosdeckung mit ansteigender Vegetationshöhe. Die Pflanzenfrequenz wurde nur im Modell der Moosquadrate beachtet und galt dort als signifikant. Die Variable verfolgte einen schwach negativen Trend, wobei die Moosquadrate mit steigender Pflanzenfrequenz leicht abnahmen. Die weiteren Variablen galten als statistisch nicht signifikant und verfolgten in beiden Modellen einen ähnlichen Trend. Die Varianzkomponente der Flächen-ID betrug beim Moosquadrat-Modell 2.098 resp. beim Moosfrequenz-Modell 10.420, wobei die Residual-Varianz beim Moosquadrat-Modell bei 3.671 und beim Moosfrequenz-Modell bei 13.400 lag. Sowohl der Unterschied innerhalb als auch zwischen den Flächen galt als signifikant.

Tabelle 5: Output der festen Effekte des LMM von Moosquadrate mit den Umweltvariablen, wobei ein t-Wert von ± 1.96 als signifikant ($ < 0.05$), $+2.58$ als hoch signifikant ($** < 0.01$) und ± 3.29 als extrem signifikant ($*** < 0.001$) gilt.*

Feste Effekte	Estimate	Standardabweichung	t-Wert	
Intercept	4.389	0.525	8.36	***
Exposition – Ost	-1.357	0.476	-2.85	**
Exposition – Süd	-1.993	0.565	-3.53	***
Exposition – West	-0.946	0.406	-2.33	*
Geländemorphologie – Mi. Hang	0.0634	0.493	0.13	
Geländemorphologie – Un. Hang	-0.242	0.606	-0.40	
Geländemorphologie – Mulde	-1.993	0.764	-2.61	**
Geländemorphologie – Kuppe	0.546	0.775	0.70	
Geländemorphologie – Flach	-0.888	0.669	-1.33	
Pflanzenfrequenz	-0.548	0.139	-3.95	***
Vegetationshöhe	-1.254	0.180	-6.98	***
Höhe über Meer	0.030	0.239	0.13	
Sonneneinstrahlung	-0.183	0.188	-0.98	

Tabelle 6: Output der festen Effekte des LMM von Moosfrequenz mit den Umweltvariablen, wobei ein t-Wert von ± 1.96 als signifikant ($ < 0.05$), $+2.58$ als hoch signifikant ($** < 0.01$) und ± 3.29 als extrem signifikant ($*** < 0.001$) gilt.*

Feste Effekte	Estimate	Standardabweichung	t-Wert	
Intercept	12.732	0.969	13.14	***
Exposition – Ost	-3.087	0.874	-3.53	***
Exposition – Süd	-5.693	1.048	-5.43	***
Exposition – West	-2.435	0.742	-3.28	**
Geländemorphologie – Mi. Hang	0.661	0.891	0.74	
Geländemorphologie – Un. Hang	1.878	1.101	1.71	
Geländemorphologie – Mulde	-3.800	1.380	-2.75	**
Geländemorphologie – Kuppe	1.375	1.400	0.98	
Geländemorphologie – Flach	0.494	1.221	0.40	

Vegetationshöhe	-2.085	0.325	-6.42 ***
Höhe über Meer	0.017	0.467	0.04
Sonneneinstrahlung	-0.312	0.344	-0.91

3.5.3 Gesamtmodelle

Zusätzlich zu den gemessenen Bewirtschaftungs- und Umweltvariablen wurden die beiden Definitionsvariablen Erhebungsreihenfolge und Gemeldet in das Gesamtmodell eingefügt (Anhang C2). Dabei konnte festgestellt werden, dass die Reihenfolge der Erhebungen keinen signifikanten Einfluss auf die Moosdeckung hatte. Folglich beeinträchtigte die zeitliche Abfolge der Datenerhebung die Ergebnisse nicht negativ. Weiter ist in den Gesamtmodellen ersichtlich, dass die von den Landwirt:innen als vermoost gemeldeten Flächen eine signifikant höhere Moosdeckung aufwiesen. Die Variablen Erhebungsreihenfolge und Gemeldet sowie einzelne Bewirtschaftungs- und Umweltvariablen wurden vom besten Gesamtmodell aussortiert, um Overfitting zu vermeiden und das beste Modell zur Evaluation der Vermoosung zu erstellen. Das beste Modell für die erklärende Variable Moosquadrat beinhaltete die Variablen Kulturtyp, Exposition, Geländemorphologie, Pflanzenfrequenz, Vegetationshöhe sowie den Random-Effekt der Flächen-ID (Tabelle 7). Das beste Modell der erklärenden Variablen Moosfrequenz verzichtete zusätzlich auf die Variable Pflanzenfrequenz (Tabelle 8). Das Modell für Moosquadrat wies einen REML von 1103.5, ein marginales R^2 von 0.380 und ein konditionales R^2 von 0.598 auf. Damit verfügte das Moosquadrat-Gesamtmodell über ein tieferes REML, jedoch ein höheres marginales und konditionales R^2 als die beiden Teilmodelle für Moosquadrat (siehe Kapitel 3.5.1 und 3.5.2). Das Modell für Moosfrequenz wies ein REML von 1428.7, ein marginales R^2 von 0.338 und ein konditionales R^2 von 0.624 auf. Demzufolge zeigte das Moosfrequenz-Gesamtmodell im Vergleich zu den anderen Moosfrequenz-Teilmodellen ein mittleres REML, jedoch das höchste marginale und konditionale R^2 (siehe Kapitel 3.5.1 und 3.5.2). Die beiden Gesamtmodelle konnten mit einer gewissen Unsicherheit die Moosdeckung vorhersagen, wobei v.a. beim Moosfrequenz-Modell die tieferen Werte höher sowie die höheren Werte tiefer prognostiziert wurden, als diese in der Realität beobachtet werden konnten (Anhang C1).

Vergleicht man den Output der beiden Modelle, sind der Intercept, die Exposition, die Geländemorphologie Mulde sowie die Vegetationshöhe in beiden Modellen signifikant. Der Estimate des Intercepts betrug bei Moosquadrat 49.847 (Tabelle 7) und bei Moosfrequenz 13.893 (Tabelle 8). Nach Rücktransformation bedeutet dies bei der Variable Moosquadrat eine Moosdeckung von 2'484,7% der Fläche und bei der Variable Moosfrequenz eine Moosdeckung von 65.3% der Fläche. Die einzige Bewirtschaftungsvariable Kulturtyp scheint in beiden Modellen nicht signifikant, wobei auf WiW eine rund 1.0% bis 2.0% tiefere Moosdeckung zu erwarten ist. Dabei ist jedoch die Standardabweichung fast genauso hoch. Betrachtet man die Variable Exposition, sind alle Kategorien signifikant, wobei die Kategorie Ost im Moosfrequenz-Modell stärker ausgeprägt ist. Der Trend, dass südlich, östlich und westlich ausgerichtete Standorte alle eine tiefere Moosdeckung aufweisen als nördlich ausgerichtete Standorte (Referenzkategorie), war bei beiden Modellen identisch. Bei der Variable Geländemorphologie war nur die Kategorie Mulde signifikant, wobei die Modelle suggerierten, dass die Moosdeckung in Mulden geringer ist als in der Referenzkategorie Oberer Hangbereich. Weiter wies auch die Vegetationshöhe einen negativen Trend auf, was bedeutet, dass die Moosdeckung mit steigender Vegetationshöhe abnimmt. Die Pflanzenfrequenz wurde im Modell der Moosfrequenz nicht berücksichtigt, galt im Modell der Moosquadrat jedoch als signifikant. Laut Modell sinkt die Moosdeckung bei steigender Pflanzenfrequenz. Die Varianzkomponente des Random-Effekts Flächen-ID betrug beim Moosquadrat-Modell 1.979 und beim Moosfrequenz-Modell 10.120, was bedeutet, dass ein signifikanter Unterschied der Moosdeckung zwischen den einzelnen Flächen besteht, jedoch beim Moosquadrat-Modell nur schwach ausgeprägt ist. Die Residual-Varianz betrug beim Moosquadrat-Modell 3.646 und beim Moosfrequenz-Modell 13.340, was

zusätzlich auf einen signifikanten Unterschied innerhalb der Flächen hinwies. Die Signifikanzen und Trends der einzelnen Variablen schienen grösstenteils über die Modelle hinweg übereinzustimmen, wobei jedoch die Bewirtschaftungsvariablen im Gesamtmodell von den Umweltvariablen überlagert wurden und an Signifikanz verloren.

Tabelle 7: Output der festen Effekte des LMM von Moosquadrate mit den Umwelt- und Bewirtschaftungsvariablen, wobei ein t-Wert von ± 1.96 als signifikant ($ < 0.05$), $+2.58$ als hoch signifikant ($** < 0.01$) und ± 3.29 als extrem signifikant ($*** < 0.001$) gilt.*

Feste Effekte	Estimate	Standardabweichung	t-Wert
Intercept	49.847	11.581	4.30 ***
Kulturtyp – WiW	-1.023	0.543	-1.88
Exposition – Ost	-1.327	0.470	-2.83 **
Exposition – Süd	-2.036	0.547	-3.72 ***
Exposition – West	-0.898	0.404	-2.22 *
Geländemorphologie – Mi. Hang	0.069	0.488	0.14
Geländemorphologie – Un. Hang	-0.252	0.599	-0.42
Geländemorphologie – Mulde	-2.090	0.761	-2.75 **
Geländemorphologie – Kuppe	0.640	0.767	0.84
Geländemorphologie – Flach	-0.882	0.656	-1.35
Pflanzenfrequenz	-0.453	0.116	-3.90 ***
Vegetationshöhe	-1.231	0.173	-7.13 ***

Tabelle 8: Output der festen Effekte des LMM von Moosfrequenz mit den Umwelt- und Bewirtschaftungsvariablen, wobei ein t-Wert von ± 1.96 als signifikant ($ < 0.05$), $+2.58$ als hoch signifikant ($** < 0.01$) und ± 3.29 als extrem signifikant ($*** < 0.001$) gilt.*

Feste Effekte	Estimate	Standardabweichung	t-Wert
Intercept	13.893	1.060	13.11 ***
Kulturtyp – WiW	-1.709	1.167	-1.46
Exposition – Ost	-3.282	0.935	-3.51 ***
Exposition – Süd	-6.223	1.105	-5.63 ***
Exposition – West	-2.562	0.800	-3.20 **
Geländemorphologie – Mi. Hang	0.742	0.955	0.78
Geländemorphologie – Un. Hang	2.032	1.179	1.72
Geländemorphologie – Mulde	-4.223	1.487	-2.84 **
Geländemorphologie – Kuppe	1.684	1.498	1.12
Geländemorphologie – Flach	0.547	1.301	0.42
Vegetationshöhe	-2.226	0.340	-6.55 ***

3.6 Zeigerpflanzen

Von den 47 Zeigerpflanzen wurden 37 im Feld nachgewiesen (Abbildung 30). "Blutwurz, Aufrechtes Fingerkraut" war die am häufigsten vorkommende Zeigerpflanze und wurde mit einer Häufigkeit von 86 auf über einem Drittel (34.1%) der Untersuchungspunkte angetroffen. Die zweit- und dritthäufigsten Zeigerpflanzen waren "Hainsimsen" und "Korbblütler, gelb, mehrköpfig", die ebenfalls auf rund einem Drittel der Untersuchungspunkte vorkamen. Danach nahm die Häufigkeit der einzelnen Pflanzenarten rapide ab. Im Durchschnitt wurden vier Zeigerpflanzen pro Untersuchungspunkt festgestellt. Die Anzahl der Zeigerpflanzen pro Untersuchungspunkt variierte zwischen null und zehn, wobei der Modus bei zwei Zeigerpflanzen lag.

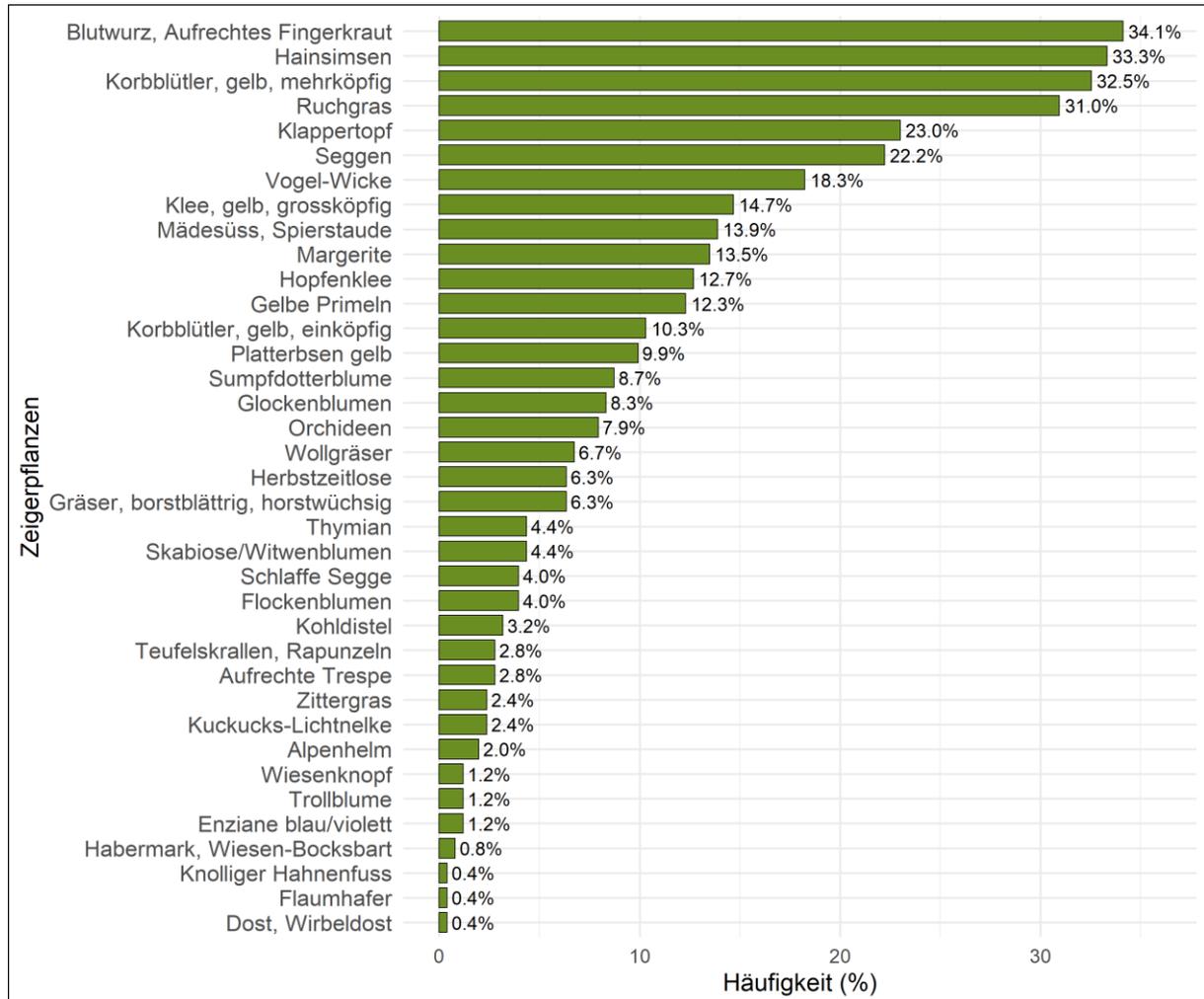


Abbildung 30: Aufführung der im Feld angetroffenen Zeigerpflanzen und deren Häufigkeit in Prozent über die total 252 Untersuchungspunkte.

In Abbildung 31 sind die durchschnittliche Moosfrequenz sowie Moosquadrate je Zeigerpflanze in Prozent dargestellt. Zeigerpflanzen mit einer Häufigkeit von weniger als neun wurden aus Abbildung 31 ausgeschlossen. "Gräser, borstblättrig, horstwüchsig" und "Blutwurz, Aufrechtes Fingerkraut" weisen sowohl die höchste resp. zweit höchste durchschnittliche Moosfrequenz als auch Moosquadrate auf. "Korbblütler, gelb, einköpfig" haben die dritthöchste Moosquadrate, allerdings wurde bei "Glockenblumen" und „Wollgräser“ eine höhere Moosfrequenz gemessen. Die niedrigste durchschnittliche Moosfrequenz sowie Moosquadrate wurden bei "Margeriten" festgestellt. Bei einigen Pflanzen, wie "Wollgräser", gibt es grosse Unterschiede zwischen Moosfrequenz und Moosquadrate, wohingegen der Unterschied bspw. beim "Thymian" geringer ist. Zudem ist die Streuung der Moosdeckung bei allen

Zeigerpflanzen gross und variiert durchschnittlich um 25.3% bei den Moosquadraten und um 33.4% bei der Moosfrequenz.

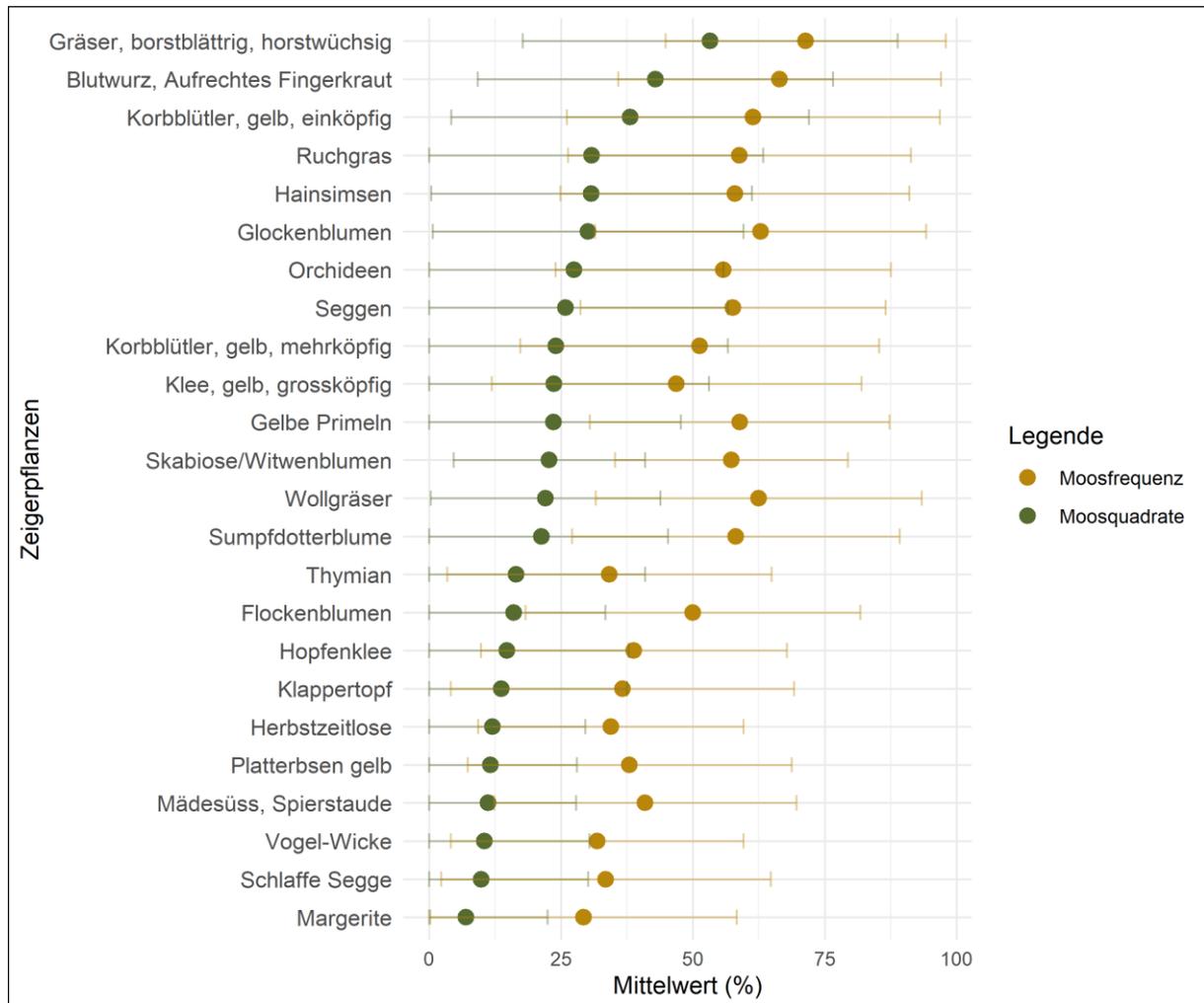


Abbildung 31: Übersicht der Durchschnittlichen Moosfrequenz (gelb) und Moosquadrate (grün), in Prozent Deckung, je Zeigerpflanze sowie deren Standardabweichung in Prozent als Linie dargestellt.

Als häufigste vorkommende Zeigerpflanze mit hoher durchschnittlicher Vermoosung wurde "Blutwurz, Aufrechtes Fingerkraut" (*Potentilla erecta*) etwas genauer betrachtet (Benz et al., 2018). *Potentilla erecta* zählt gemäss Ellenberg & Leuschner (2010) zu den Halbschatten- bis Halblichtpflanzen. Sie bevorzugt ein subozeanisches Klima und ist indifferent gegenüber Temperatur, Feuchtigkeit und Boden-pH. Diese Pflanze kommt vorwiegend auf nährstoffarmen, salzfreien Böden vor.

Zu der Gruppe der "Gräser, borstblättrig, horstwüchsig", welche die höchste Vermoosung aufweist, gehören bspw. die drei Arten *Festuca ovina*, *Deschampsia flexuosa* und *Nardus stricta*. Die Ellenberg-Zeigerwerte dieser drei Arten sind ähnlich und wurden repräsentativ für alle "Gräser, borstblättrig, horstwüchsig" betrachtet (Ellenberg & Leuschner, 2010). Es scheint sich um eine Artengruppe zu handeln, die zu den Halblichtpflanzen gehört und ein subozeanisches Klima bevorzugt. Dabei sind sie indifferent gegenüber Temperatur sowie Feuchtigkeit und bevorzugen saure, nährstoffarme und salzfreie Böden.

Die "Margeriten" wiesen die geringste Vermoosung auf und wurden an 34 Untersuchungspunkten gefunden. Da in der Liste der Zeigerpflanzen nicht zwischen den einzelnen Margeriten-Arten unterschieden wurde, wird hier *Leucanthemum vulgare* repräsentativ für die gesamte Zeigerpflanzengruppe näher betrachtet. *Leucanthemum vulgare* ist eine Halblichtpflanze von subozeanischer Art, die gegenüber Temperatur und Boden-pH indifferent ist. Sie bevorzugt eher trockene, nährstoffarme Standorte.

3.7 Moosarten

Fast alle gefundenen Moosarten waren Halbschatten- bis Halblichtpflanzen (Tabelle 9). Während *Plagiomnium undulatum* und *Thuidium tamariscium* als Schatten- bis Halbschattenpflanzen deutlich weniger Licht benötigen, gehört *Straminergon stramineum* zu den Halblicht- bis Volllichtpflanzen. Bezüglich der Temperaturansprüche sind die angetroffenen Moosarten ähnlich und gelten meist als Kühle- bis Mäsigwärmezeiger. Ihr Verbreitungsschwerpunkt liegt grösstenteils im semikontinentalen Bereich resp. gemäss Ulmer Zeigerwerten im montanen Bereich (swissbryophytes, 2024). Die meisten gefundenen Moosarten bevorzugen frische bis feuchte sowie saure Standorte. Die Nährstoffzahl aller gefundenen Moosarten ist indifferent, und auch die Salzzahl ist bei allen aufgefundenen Moosarten identisch und nicht salztragend (Ellenberg & Leuschner, 2010). Eine Moosart konnte nur bis auf seine Gattung *Polytrichum* bestimmt werden und ist daher in Tabelle 9 nicht aufgeführt.

Viele der angetroffenen Moosarten haben ein grosses Spektrum an möglichen Lebensräumen und gelten als Generalisten (swissbryophytes, 2024). Die am häufigsten angetroffene Moosart war *Rhytidiadelphus squarrosus*. Diese kräftige Moosart wächst bevorzugt auf feuchten Wiesen und kann teilweise sogar schwache Gräser verdrängen (Frahm & Frey, 2004).

Tabelle 9: Zeigerwerte nach Ellenberg von den gefundenen Moose, wobei L = Lichtzahl, T = Temperaturzahl, K = Kontinentalitätszahl, F = Feuchtezahl, R = Reaktionszahl, N = Nährstoffzahl, S = Salzzahl.

Art	Lichtzahl	Temperaturzahl	Kontinentalitätszahl	Feuchtezahl	Reaktionszahl	Nährstoffzahl	Salzzahl
<i>Climacium dendroides</i>	L7	T3	K5	F6	R5	Nx	S0
<i>Sphagnum palustre</i>	L7	T4	K5	F6	R2	Nx	S0
<i>Sphagnum anustifolium</i>	L7	T3	K6	F7	R2	Nx	S0
<i>Straminergon stramineum</i>	L8	T2	K6	F8	R2	Nx	S0
<i>Rhytidiadelphus squarrosus</i>	L7	T3	K6	F6	R5	Nx	S0
<i>Pseudoscleropodium purum</i>	L6	T4	K5	F4	R5	Nx	S0
<i>Plagiomnium undulatum</i>	L4	T3	K5	F6	R6	Nx	S0
<i>Thuidium tamariscium</i>	L4	T4	K4	F7	R4	Nx	S0
<i>Calliergonella cuspidata</i>	L8	T3	K5	F7	R7	Nx	S0
Durchschnitt	L6	T3	K5	F6	R4	Nx	S0
Minimum	L4	T2	K4	F4	R2	Nx	S0
Maximum	L8	T4	K6	F8	R7	Nx	S0

4 Diskussion

4.1 Vermoosung von BFF und NHGF

Die Problematik der Vermoosung beschäftigt die Landwirt:innen des Entlebachs schon seit längerem. Die von den Landwirt:innen gemeldeten Flächen wiesen eine erhöhte Moosdeckung auf. Dabei wurden auch noch andere Flächen untersucht und es konnte über alle 63 Untersuchungsflächen resp. 252 Untersuchungspunkten eine mittlere Moosdeckung von 24.5% nach der Messmethode der Variable Moosquadrate und 50.4% nach der Messmethode der Variable Moosfrequenz berechnet werden. Dabei wurden Flächen auf dem gesamten Spektrum – von einer Moosdeckung von 0% bis zu einer Moosdeckung von 100% – aufgefunden. Nicht nur der Mittelwert, auch der Median der Moosquadrate-Variable lag tiefer als jener der Moosfrequenz-Variable (siehe 3.1). Dabei waren die Moosdeckungs-Werte der Messmethode für die Variable Moosquadrate etwas geringer, insbesondere bei niedriger Moosfrequenz. Eine höhere Moosfrequenz im Vergleich zu Moosquadrate scheint jedoch plausibel, da einerseits ein Teil der Moosdeckung durch die Vegetation verdeckt wird und andererseits die Punkt-Frequenz-Methode gemäss Vanha-Majamaa et al. (2000) die Moosdeckung tendenziell überschätzt. Allgemein bestand ein starker Zusammenhang zwischen den beiden Vermoosungsvariablen.

Lichtenecker et al. (2003) sowie Bohner et al. (2006) haben beide ähnlich zur Methode zur Erhebung der Variable Moosquadrate die Moosdeckung nach Braun-Blanquet (1964) erhoben. Dabei sprach Lichtenecker et al. (2003) bereits viel früher als Bohner et al. (2006) von einer Beeinflussung der Vegetation durch die Moosausbreitung (siehe Kapitel 1). Beide sagen jedoch aus, dass sich der Einfluss der Moosdeckung je nach Vegetationscharakteristika unterscheidet. In unserem Fall deutet die Ergebnisse darauf hin, dass die Vegetation einzelner Standorte durch die Moosdeckung beeinflusst wird (Tabelle 10). Gemäss Lichtenecker et al. (2003) wäre dann im Entlebach bei Messung der Moosquadrate fast die Hälfte der Standorte von leichter Vermoosung betroffen, während bei über einem Drittel von einer stärkeren Vermoosung zu sprechen wäre. Nach Bohner et al. (2006) wären es knapp ein Drittel der Untersuchungspunkte mit leichter Vermoosung und weniger als ein Viertel mit stärkerer Vermoosung. Ein Grossteil der Standorte wies auf dem Untergrund etwas Moos auf. Hingegen wurden 70 Untersuchungspunkte mit einem Moosquadrat-Wert von null resp. keiner von oben ersichtlichen Moosdeckung aufgefunden, was darauf hinweist, dass die Moosdeckung dort keinen relevanten Einfluss auf die Vegetation hat. Weiter ist die Moosdeckung innerhalb der Flächen meist sehr variabel. Diese Ergebnisse zeigen, dass ein breites Spektrum der Vermoosung vorhanden ist. Es muss jedoch zwischen den einzelnen Lebensraumtypen differenziert werden, da bestimmte Vegetationen sensibler auf Moose reagieren, wohingegen letztere in anderen Lebensräumen zu einem gesunden Ökosystem dazugehören (Fergus et al., 2017; Lichtenecker et al., 2003).

Tabelle 10: Prozentualer Anteil der Untersuchungspunkte mit einer Moosdeckung grösser als den von Lichtenecker et al. (2003) und Bohner et al. (2006) definierten Werten.

Moosdeckung (%)		Prozentualer Anteil der Untersuchungspunkte	
Lichtenecker et al. (2003)	Bohner et al. (2006)	Moosquadrate (%)	Moosfrequenz (%)
Leichte Vermoosung (>10%)		45.6	82.9
Stärkere Vermoosung (>20%)		37.3	71.8
	Leichte Vermoosung (>30%)	32.1	64.3
	Stärkere Vermoosung (>60%)	17.5	45.2

Vergleich mit der aufgestellten Hypothese Die Hypothese, dass BFF und NHGF in der UBE vermehrt von einer Vermoosung betroffen sind, kann weitgehend angenommen werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die mittlere Moosdeckung bei 24.5% (Moosquadrat) und 50.4% (Moosfrequenz) liegt, was auf eine teilweise signifikante Moosdeckung hinweist. Jedoch variiert die Moosdeckung stark, und bei einem grossen Teil der Fläche ist eine geringe Moosdeckung anzutreffen. Die Varianz zwischen den Standorten deutet darauf hin, dass verschiedene Umweltfaktoren und landwirtschaftliche Praktiken die Moosdeckung beeinflussen. Es fehlen jedoch Vergleiche zur Moosdeckung in anderen Regionen der Schweiz.

4.2 Einfluss der landwirtschaftlichen Praktiken

Während der Feldarbeiten äusserten diverse Landwirt:innen, dass die BFF und NHGF im Laufe der Zeit einen Verlust der Biodiversität resp. Blütenvielfalt erleiden. Viele Landwirt:innen verbanden Biodiversitätsverlust mit dem Verlust einer farbig blühenden Blütenwiese. Oft wurde in diesem Zusammenhang von Ausmagerung gesprochen. Dieser Prozess der Ausmagerung geht gemäss Landwirt:innen häufig mit einem Anstieg der Moosdeckung einher. Auch diverse Literatur bestätigt, dass eine extensive Bewirtschaftung zu Veränderungen der Vegetation und dem Wechsel von einer Vielfalt an Gefässpflanzen zugunsten von rhizombildenden, schnittempfindlichen und schattenverträglichen Pflanzenarten führt (Bohner et al., 2006; Zechmeister & Moser, 2001). Diese Veränderung der Dominanzverhältnisse beeinflusst die Ressourcenkonkurrenz und Nischenverfügbarkeit (Jeschke, 2008). In unseren Daten konnte mit dem Alter der extensiv bewirtschafteten Fläche weder eine Abnahme der Anzahl Zeigerpflanzen noch eine Zunahme der Moosdeckung festgestellt werden. In den Teilmodellen stellte sich das Alter der BFF als nicht signifikant heraus und wurde für das Gesamtmodell aufgrund fehlender Relevanz nicht weiter berücksichtigt. Die Beobachtungen aus Bohner et al. (2006) sowie die Aussagen der Landwirt:innen konnten somit nicht bestätigt werden. Es ist jedoch zu berücksichtigen, dass zwar Flächen mit unterschiedlichem Alter – von der Einführung im Jahr 1992 bis 2023 – untersucht wurden, diese aber jeweils unterschiedliche Bewirtschaftungsgeschichten und Vegetationszusammensetzungen aufwiesen. Diese unterschiedlichen Charakteristika führten zu einer vielfältigen Ausgangslage, die einen direkten Vergleich erschwerte (Trommler et al., 2013). Zusätzlich wird im LAWIS-Auszug der Start der Verpflichtungsdauer resp. das Alter bei Wechsel des Bewirtschaftenden oder Neuerfassung der Fläche an das aktuelle Jahr angepasst (Federer, 2024), was die Daten zusätzlich verfälschte.

Unabhängig vom Alter der Fläche soll allgemein eine verminderte Biodiversität das Mooswachstum begünstigen (Fergus et al., 2017). In den erhobenen Daten konnte jedoch kein Zusammenhang zwischen der ökologischen Qualität oder der Vielfalt an Zeigerpflanzen in Bezug auf die Moosdeckung festgestellt werden. Im Gegensatz dazu bestätigen die Landwirt:innen, dass sie einen Zusammenhang zwischen Biodiversität und Moosdeckung beobachten können. Dabei weisen ausgemagerte Flächen mit geringerer Blütenvielfalt und höherem Grasanteil eine erhöhte Moosdeckung auf. Gräser spielen in diesem Kontext eine besondere Rolle, da sie weniger Schatten verursachen, aber trotzdem ein feuchtes Mikroklima ermöglichen (Müller et al., 2012). Da Moose konkurrenzschwach sind, werden sie durch eine lückige Vegetation begünstigt (Jeschke, 2008) sowie bevorzugen sie ein gewisses Trade-Off zwischen Lichtverfügbarkeit und Feuchtigkeit. Jedoch schienen weder die Anzahl der Zeigerpflanzen noch die Qualitätsstufe in den Teilmodellen signifikant. Ferner wurden die beiden Variablen im Gesamtmodell nicht weiter als relevant erachtet.

Allgemein wurden in den Gesamtmodellen nur die Bewirtschaftungsvariable Kulturtyp beachtet, da sich die anderen Bewirtschaftungsvariablen bei der Auswahl des besten Modells als nicht relevant im Zusammenhang mit der Moosdeckung erwiesen. Bereits in den Teilmodellen war, mit Ausnahme der Höhenzone im Moosfrequenz-Modell, nur der Kulturtyp signifikant. Die Signifikanz der Höhenzone kann jedoch durch einen indirekten Effekt der NHGF erklärt werden: In höheren Lagen kommen vermehrt NHGF vor,

welche gemäss deskriptiver Statistik eine signifikant höhere Moosdeckung aufweisen. Dies erhöhte Moosdeckung lässt sich damit begründen, dass im Entlebuch viele NHGF dem Moorschutz unterliegen und feuchte Moorstandorte gute Bedingungen für diverse Moosarten aufweisen (Iawa, 2024d; Schmidt et al., 2016). Beim Kulturtyp war bereits im Feld ein subjektiv klarer Unterschied erkennbar. WiW wirkten dichter und wiesen meist eine höhere Vegetation auf. Die deskriptive Statistik weist auf eine tiefere Moosdeckung auf WiW hin, wobei keine Veränderungen der Pflanzen- und Bodenfrequenz ersichtlich waren, im Gegensatz zur Aussage in Briemle (1994), zitiert nach Breunig (2004).

Die Nutzungsintensität beeinflusst nicht nur die Vegetationsdichte (Briemle (1994), zitiert nach Breunig (2004)), sondern auch die Biodiversität (KBNL, 2024). Bei extensiver Bewirtschaftung soll eine höhere Biodiversität vorhanden sein (Zechmeister, 2014; Zechmeister & Moser, 2001). Intensiv bewirtschaftete Wiesen weisen oft eine geringere Biodiversität auf, wobei durch die Düngung eine effiziente Platznutzung durch Gefässpflanzen ermöglicht wird (Müller et al., 2012). Dabei nimmt bei intensiver Bewirtschaftung auch die Moosdeckung ab (Carroll et al., 2000). Moose reagieren sensibel auf Nährstoffeinträge und haben einen niedrigen Critical Level bzgl. Stickstoffeinträgen (Guntern, 2016; Wey, 2023). Hingegen ist bei extensiver Bewirtschaftung das Samenpotential entscheidend (Huguenin-Elie, 2024). Bei grossem Samenpotential herrscht eine hohe Biodiversität und dementsprechend eine hohe Nischenausnutzung und Ressourcenkonkurrenz, denen die Moose nicht gewachsen sind. Das Samenpotential kann durch den Schnittzeitpunkt und das Schnittregime beeinflusst werden, da ein zu früher Schnitt die Absamung der Pflanzen verhindern kann (Iawa, 2019; van Klink et al., 2017). In den Modellen konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem Schnittzeitpunkt oder -regime mit der Moosdeckung eruiert werden. Ähnliche Beobachtungen wurden bereits in einer Studie von van Klink et al. (2017) und Humbert et al. (2018) gemacht.

Zusammenfassend suggerieren bestehende Untersuchungen, dass auf intensiven sowie biodiversen extensiven Wiesen eine geringe Moosdeckung aufzufinden ist, wobei der Schnittzeitpunkt und das Schnittregime nicht relevant zu sein scheinen. Dies konnte durch unsere Daten nicht abschliessend bestätigt werden. Die Botanik und Biodiversität der Flächen wurden nur rudimentär betrachtet, weshalb keine abschliessende Erkenntnisse erlangt werden konnten. Allgemein konnte jedoch beobachtet werden, dass gemäss Teilmodellen auf WiW durchaus eine geringere Moosdeckung aufgefunden werden konnte. Dieser Effekt ist im Gesamtmodell jedoch nicht mehr signifikant. Die Bewirtschaftungsvariablen werden im Gesamtmodell von den Umweltvariablen überlagert. Diese Beobachtung steht im Gegensatz zu den Untersuchungen von Boch et al. (2018), bestätigt jedoch die Aussage in Hanson et al. (1998), dass die Vermoosung aufgrund der natürlichen Gegebenheiten entstehen und durch Bewirtschaftungsmethoden verstärkt werden kann.

Ein möglicher Störfaktor in den Ergebnissen ist der teilweise induzierte Stickstoffeintrag auf EW durch die Einschwemmung von Nährstoffen bei Flächen in Hanglagen. Diese konnten trotz Einbezug des Randeffekts nicht ganzheitlich berücksichtigt werden. Auch die Zugabe von Mist könnte eine Rolle spielen. Da dieser zusätzliche Nährstoffeintrag nicht bei allen Flächen gleich stark war oder teilweise nicht bekannt war, wurde dieser Faktor nicht weiter berücksichtigt. Es ist zu erwarten, dass die Korrelation zwischen der Moosdeckung und der Nutzungsintensität deutlicher wäre, wenn kein zusätzlicher Stickstoffeintrag auf EW stattfände, und somit die durchschnittliche Moosdeckung auf EW grösser wäre.

Vergleich mit der aufgestellten Hypothese Die Hypothese, dass landwirtschaftliche Praktiken die Vermoosung hemmen oder begünstigen können, kann teilweise angenommen werden. Es konnte bestätigt werden, dass die Nutzungsintensität einen signifikanten Einfluss auf die Moosdeckung hat. Dieser Effekt wird jedoch entgegen den Erwartungen durch Umweltfaktoren übersteuert. Des Weiteren scheinen die restlichen untersuchten Bewirtschaftungsvariablen keinen signifikanten Einfluss auf die Moosdeckung zu haben. Zusätzlich konnte, möglicherweise aufgrund einer schlechten Datengrundlage, keine Ausmagerung der BFF und NHGF mit zunehmendem Alter beobachtet werden.

4.3 Topographische und umweltbezogene Faktoren

Die Beziehung zwischen Moosen und Gefässpflanzen in Grünlandökosystemen ist komplex und wird von verschiedenen ökologischen Faktoren beeinflusst, darunter Lichtverfügbarkeit, Feuchtigkeit, Konkurrenz und Standortbedingungen (Fergus et al., 2017). Ein Mangel an Licht und andere Faktoren können zu offenen Bodenstellen führen, die die Vermoosung begünstigen (Jeschke, 2008). Während der Feldarbeit konnte dieser Zusammenhang subjektiv beobachtet werden: An schattigen Standorten, wie in Waldrandnähe und an schattigen Hängen, wurde eine erhöhte Moosdeckung sowie eine andere Vegetationszusammensetzung festgestellt. An sonnigen Standorten wurden hingegen andere Zeigerpflanzen wie bspw. die Margerite sowie eine geringere Moosdeckung aufgefunden. Dieser Zusammenhang zwischen der Sonneneinstrahlung und der Moosdeckung zeigte sich in der deskriptiven Statistik als signifikant. In den Teilmodellen war die Sonneneinstrahlung jedoch nicht signifikant und wurde in den Gesamtmodellen nicht weiter berücksichtigt. Interessant war, dass ein Zusammenhang zwischen der Sonneneinstrahlung und der Exposition bestand, wobei die Exposition in den Gesamtmodellen signifikant war. An nördlich ausgerichteten Standorten wurde durchschnittlich die geringste Sonneneinstrahlung berechnet und die höchste Moosdeckung festgestellt. An südlich ausgerichteten Standorten wurde hingegen die höchste Sonneneinstrahlung berechnet und die geringste Moosdeckung festgestellt. Da die Sonneneinstrahlung u. a. basierend auf der Exposition und Hangneigung berechnet wurde (Esri Inc, 2024b), ist nicht ganz klar, warum der erwartete Zusammenhang zwischen Exposition, Sonneneinstrahlung und Moosdeckung in den Modellen nicht ersichtlich war. Es wird angenommen, dass dies auf die schlechte Datengrundlage sowie die Irrelevanz der Hangneigung in Bezug auf die Moosdeckung zurückzuführen ist. Weiter wird angenommen, dass insbesondere die Lichtverfügbarkeit resp. Beschattung in Bezug auf Moose, unter Berücksichtigung der Vegetationseinflüsse, relevant ist. Um dies zu bestätigen, müsste die Lichtverfügbarkeit am Boden aus der Perspektive der Moose gemessen werden.

Neben der Lichtverfügbarkeit ist auch die Feuchtigkeit ein entscheidender Faktor, der die Moosdeckung beeinflusst (Fergus et al., 2017). Moose bevorzugen hohe Feuchtigkeit sowohl im Substrat als auch in der Luft (Urmi et al., 2007). Bspw. speichern Mulden mehr Wasser und sind daher feuchter (Liu et al., 2020), was eine höhere Moosdeckung suggeriert. In den erhobenen Daten zeigte sich jedoch das Gegenteil: In Mulden war die Moosdeckung am geringsten. Diese Diskrepanz könnte auf die besonderen Bedingungen während der Feldarbeit zurückzuführen sein, da es sehr regnerisch und nass war, wodurch Moose möglicherweise unter Wasser verborgen blieben und nicht gesehen wurden (Liu et al., 2020). Weiter könnten die in den Mulden angeschwemmten Nährstoffe die Moosdeckung minimieren. Zudem konnte im Feld beobachtet werden, dass Moose zwar gerne feuchte Standorte hatten, jedoch bei zu nassen Standorten nicht mehr dominierend waren. Nicht nur in Mulden, sondern auch in höheren Lagen herrscht oft eine höhere Bodenfeuchtigkeit (Jeyakumar et al., 2020). Die zusätzlich kälteren Bedingungen in höheren Lagen führen dabei zu einer karger Vegetation. Da viele Moosarten gut an kältere Bedingungen angepasst sind und Standorte mit geringer Konkurrenz bevorzugen, könnte man mit zunehmender Höhe über dem Meeresspiegel eine durchschnittlich höhere Moosdeckung erwarten (Zechmeister, 2014). In den erhobenen Daten ist ein leichter Anstieg der Moosdeckung mit der Höhe über dem Meeresspiegel zu erkennen. Dieser Anstieg ist jedoch sehr schwach und statistisch nicht signifikant. Der Trend könnte durch die vermehrt höher gelegenen NHGF verstärkt werden. Wiederrum wird der Trend dadurch abgeschwächt, dass über das gesamte Entlebuch hinweg in höheren Lagen mehr WiW als EW vorhanden sind und WiW eine durchschnittlich tiefere Moosdeckung aufweisen. Gemäss Landwirt:innen werden WiW bevorzugt an Standorten angelegt, die für sie schwer erreichbar sind, aber trotzdem eine brauchbare Futterqualität erreichen können. Allgemein wurden WiW in den letzten Jahren aufgrund der sinkenden Beiträge weniger beliebt (Chevillat et al., 2017). In höheren Lagen scheinen WiW aufgrund der schlechteren Erreichbarkeit beliebter zu sein. Die Direktzahlungsbeiträge sind in den betrachteten Höhenzonen gleich und beeinflussen daher die Entscheidung der Landwirt:innen nicht (AGRIDEA, 2024).

Allgemein sind die Standortfaktoren und das Mikroklima stark durch die Vegetationszusammensetzung bestimmt (Regmi et al., 2019). Eine Vegetation, die eine moderate Lichtverfügbarkeit sowie hohe Luft- und Bodenfeuchtigkeit ermöglicht, begünstigt Moose (Urmi et al., 2007). Gleichzeitig sind offene Bodenstellen wichtig, da dort weniger Konkurrenz vorhanden ist und Moose ausreichend Platz zur Ansiedlung finden (Jeschke, 2008). In grösseren Vegetationslücken können sich ganze Moosteppiche ausbreiten, die die Ansiedlung und Keimung weiterer Pflanzen verhindern können (Hanson, 1950). Dabei ist umstritten, ob kräftige Moose wie das *Rhytidiadelphus squarrosus* schwache Gräser und andere Gefässpflanzen verdrängen können oder sich nur in Lücken etablieren (Frahm & Frey, 2004; Huguenin-Elie, 2024). Eine langfristige Untersuchung der Vegetationsentwicklung in Lücken und nach Störungen konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt werden. Die groben Analysen der Vegetationszusammensetzung ergaben jedoch, dass die meisten Untersuchungspunkte keine grösseren Vegetationslücken aufwiesen. Die Bodenfrequenz lag meistens bei 0%, wobei die vorhandenen Lücken häufig aufgrund von Störungen wie Mäusehügeln oder kleineren Rutschungen entstanden sind. Auch die Pflanzenfrequenz deutete auf eine dichte Vegetation hin. Nur 18 Untersuchungspunkte wiesen eine verminderte Pflanzenfrequenz auf, wobei ein Grossteil dieser Standorte eine erhöhte Moosdeckung aufwies. Dieser negative Trend zwischen der Moosdeckung und Pflanzenfrequenz gilt in den Moosquadrat-Modellen als signifikant (analog zur deskriptiven Statistik). Dabei besteht jedoch nur eine sehr schwache Reduktion der Moosdeckung bei steigender Pflanzenfrequenz. Entgegen den Erwartungen war jedoch die Pflanzenfrequenz in den Moosfrequenz-Modellen nicht signifikant. Die Inkohärenz zwischen den beiden Gesamtmodellen könnte aufgrund der diversen Störungen (Mäusehügel, Rutschungen etc.) oder einer Fehlentscheidung bei der Wahl des besten Modells resultiert haben. Ausserdem konnte durch die Methode der Moosquadrate der Einfluss der Moosdeckung auf die Vegetation besser veranschaulicht werden (Vanha-Majamaa et al., 2000). Da die Pflanzenfrequenz diesen Einfluss misst, erscheint ein Zusammenhang dieser beiden Variablen durchaus schlüssig. Der Einfluss der Vegetationsdynamik auf die Moosdeckung kann nicht abschliessend geklärt werden. Jedoch wurde zusätzlich ermittelt, dass die Vegetationshöhe einen signifikanten Einfluss auf die Moosdeckung zu haben scheint. In allen Modellen sowie in der deskriptiven Statistik besteht ein negativer Zusammenhang zwischen der Moosdeckung und der Vegetationshöhe. Diese Ergebnisse stützen die Literatur, dass die Vegetationszusammensetzung und -dynamik das Mooswachstum beeinflussen (Fergus et al., 2017).

Während die Vegetationshöhe signifikante Auswirkungen auf die Moosdeckung zeigte, schien die Position im Hang nicht weiter relevant zu sein. Das Schnittgut wird nach dem Mähen oft in den unteren Hangbereich gereicht und dort kurzfristig liegengelassen. Der daraus resultierende zusätzliche Nährstoffeintrag sowie die verminderte Licht- und Luftverfügbarkeit hemmen das Mooswachstum (Richner et al., 2014). Dieser Effekt kann durch zusätzliche Nährstoffe, die durch Regenwasser den Hang hinuntergespült werden, verstärkt werden (Sadava et al., 2019; Schnyder & Bergamini, 2017). In den Untersuchungen wurde, um den Randeffekt zu minimieren, ein Pufferstreifen, unabhängig von der Hangneigung und der Nutzung oberhalb der Fläche (Wald, intensive Wiese etc.), festgesetzt. Dadurch konnten jedoch nicht alle Einflüsse restlos eliminiert werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Moosdeckung in Grünlandökosystemen von einer Vielzahl ökologischer Faktoren beeinflusst wird. Dabei sind die Exposition, Geländemorphologie, Vegetationshöhe sowie weitere Vegetationseigenschaften von Bedeutung. Es bestehen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Faktoren, welche die Komplexität der Thematik verdeutlichen.

Vergleich mit der aufgestellten Hypothese Die Hypothese, dass Umweltfaktoren die Moosdeckung hemmen oder begünstigen können, kann angenommen werden, wobei nicht alle Standort- und Vegetationsfaktoren relevant zu sein scheinen. Es kann bestätigt werden, dass an nördlich exponierten Hängen sowie bei geringer Vegetationshöhe eine signifikant höhere Moosdeckung vorkommt. Entgegen den Erwartungen konnte in Mulden eine verminderte Moosdeckung festgestellt werden, während die

restlichen gemessenen Geländemorphologien und Terraineigenschaften nicht weiter signifikant waren. Allgemein scheinen die Umweltfaktoren einen stärkeren Einfluss auf die Moosdeckung zu haben als die Bewirtschaftungsfaktoren.

4.4 Ergänzende Faktoren und Beobachtungen

4.4.1 Zeigerpflanzen

Während der Feldarbeiten wurde auf den Untersuchungsflächen eine hohe Heterogenität der Vegetation festgestellt. Dabei wurde bei den Untersuchungspunkten zwischen null und zehn Zeigerpflanzen angetroffen. Ein Grossteil der Zeigerpflanzengruppen gemäss der Liste in Benz et al. (2018) konnten während der Feldarbeit aufgefunden werden. Diese grosse Vielfalt deutet darauf hin, dass Flächen mit unterschiedlichen ökologischen Potenzialen untersucht wurden.

Die häufigste Zeigerpflanze war die "Blutwurz, Aufrechtes Fingerkraut", die gemäss Ellenberg & Leuschner (2010) als Generalist bekannt ist und bevorzugt Regionen mit gelegentlichem Licht und hoher Luftfeuchtigkeit besiedelt (siehe 3.7). Diese Pflanzenart war eher auf Flächen mit erhöhter Moosdeckung anzutreffen, was aufgrund ihrer Habitatansprüche, die sich mit denen der aufgefundenen Moosarten überschneiden, plausibel erscheint. Ähnlich verhielt es sich bei den "Gräsern, borstblättrig, horstwüchsig", die eher feuchtere Standorte bevorzugen und im Feld häufig auf moorigen NHGF entdeckt wurden (Ellenberg & Leuschner, 2010a). Da NHGF eine erhöhte Moosdeckung aufweisen und Moose auch meist feuchte Standorte bevorzugen, scheint dieser Zusammenhang einsichtig (Urmi et al., 2007). Im Gegensatz dazu bevorzugt die "Margerite" eher sonnige Standorte (Ellenberg & Leuschner, 2010a) und konnte während der Feldarbeiten oft an eher sonnigen Lagen in höheren Dichten angetroffen werden. Die geringere Moosdeckung an den Untersuchungsstandorten mit "Margeriten" lässt sich durch die erhöhte Konkurrenzkraft der anderen Pflanzen bei guten Lichtverhältnissen sowie die abweichenden Habitatansprüche erklären (Jeschke, 2008).

Ein interessantes Ergebnis der Untersuchung war die Diskrepanz zwischen den Messungen der Moosquadrate und der Moosfrequenz je Zeigerpflanze. Diese Unterschiede könnten darauf hinweisen, dass verschiedene Aspekte der Moosdeckung erfasst wurden, möglicherweise bedingt durch strukturelle Unterschiede in der Vegetation und der Verteilung des Moores. Bspw. wurde der "Thymian" eher als bodennahe Pflanze beobachtet, wobei dieser in ähnlicher Masse wie Moos von der Vegetation überdeckt werden kann und daher Moos nur schwer überwachsen kann. Eine ähnliche Moosfrequenz wie Moosquadrate scheint daher schlüssig. "Mädesüss, Spierstaude" hingegen ist gross und kann das Moos beschatten, was durch eine Bedeckung des Untergrunds in einer höheren Moosfrequenz als Moosquadrate resultiert. Zusätzlich kann die Diskrepanz auch teilweise durch die hohe Standardabweichung der Moosdeckung erklärt werden.

Die Identifikation von Zeigerpflanzen, die mit einer höheren Moosdeckung korrelieren, könnte für zukünftige Managementstrategien von Bedeutung sein. Massnahmen zur gezielten Kontrolle und Förderung bestimmter Pflanzenarten könnten eingesetzt werden, um die Moosbedeckung zu reduzieren, ohne dass spezifische Mooskenntnisse erforderlich sind. Dies entspricht den Erkenntnissen von Fergus et al. (2017), der feststellte, dass die Vegetation die Moosdeckung massgeblich beeinflusst sowie die Habitatpräferenzen von einzelnen Zeigerpflanzen mit denen der Moose korrelieren.

4.4.2 Moosarten

Die klimatischen Gegebenheiten im Entlebuch sowie die Fundorte der Moose, die bevorzugt an feuchten und schattigen Standorten sowie in Waldrandnähe liegen, stimmen mit den Zeigerwerten der

gefundenen Moosarten nach Ellenberg & Leuschner (2010) überein (siehe 3.7). Laut Aussagen der Landwirt:innen sind die meisten Böden in der Region sauer, was sich auch in der Reaktionszahl der gefundenen Moosarten widerspiegelt (Bühler, 1940). Zusätzlich wird die Region Entlebuch durch lehmige Böden dominiert, welche dazu führen, dass der Boden eher feucht bleibt und somit optimale Bedingungen für feuchteliebende Arten wie Moose herrschen (Schüpbach, 2002). Gemäss Ellenberg-Zeigerwerten scheint das Nährstoffniveau keinen bedeutenden Einfluss auf die angetroffenen Moosarten zu haben. Wie in Bergamini & Pauli (2001) erläutert, reagieren die Moosarten jedoch durchaus sensibel auf Nährstoffeintrag. Es ist möglich, dass die indifferente Nährstoffzahl auf die besondere Eigenschaft der Moosarten zurückzuführen ist, dass sie Nährstoffe aus der Luft aufnehmen können (Arróniz-Crespo et al., 2008).

Während der Feldarbeiten konnten diverse homogene Moosteppe, nur aus *Rhytidiadelphus squarrosus* bestehend, identifiziert werden. Es ist gut möglich, dass sich diese Moosart am besten an die Bedingungen in den BFF und NHGF des Entlebachs angepasst hat und daher häufig vorkommt. Ob gewisse Moosarten die höheren Pflanzen bei geeigneten Bedingungen wirklich verdrängen können, kann jedoch nicht abschliessend beurteilt werden.

4.5 Methodenkritik

4.5.1 Feldarbeit und Datenerhebung

Die Felderhebungen wurden über einen Zeitraum von drei Wochen durchgeführt. Während dieser Zeit wurde erwartet, dass die Vegetation wächst, was zu einer Diskrepanz in der Vegetationshöhe von den ersten bis zu den letzten Tagen der Feldarbeiten hätte führen können (Hobbs & Mooney, 1990). Um diesem Trend entgegenzuwirken, wurden die Flächen nach ihrer Höhenlage geordnet untersucht: Zuerst wurden die tiefer gelegenen Flächen untersucht, gefolgt von den höher gelegenen Flächen. Diese Vorgehensweise diente dazu, eine systematische Verzerrung durch das Vegetationswachstum zu vermeiden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Vegetationshöhe während der Feldarbeiten sogar rückläufig war. Dies kann zum einen auf aussergewöhnlich ungünstige Wetterbedingungen zurückgeführt werden, die das Vegetationswachstum stark einschränkten, und zum anderen darauf, dass in höheren Lagen mehr NHGF vorkamen, die oft eine geringere Vegetationshöhe aufwiesen. Die Beziehung zwischen Vegetationshöhe und Erhebungsreihenfolge war nicht signifikant. Demnach konnte eine Verfälschung der Daten durch das erwartete Vegetationswachstum erfolgreich verhindert werden.

Die ungünstigen Wetterbedingungen hatten noch weitere Auswirkungen. Die Feldarbeiten wurden früh im Jahr durchgeführt, als sich viele Pflanzen noch im vegetativen Stadium befanden. Aufgrund der Wetterbedingungen waren die Pflanzen weniger entwickelt als erwartet. Dies erschwerte die Identifikation von Zeigerpflanzen und könnte dazu geführt haben, dass einige Pflanzen übersehen wurden. Pflanzen wie der "Wirbeldost", der erst von Juli bis September blüht, wurden selten gefunden, während Arten wie die "Margerite", die bereits im Mai blüht, häufiger entdeckt wurden (InfoFlora, 2018a, 2018c). Trotz dieser Einschränkungen war eine frühe Vegetationsaufnahme notwendig, denn die Flächen mussten vor dem ersten Schnitt untersucht werden. Dies war zur Bestimmung der Zeigerpflanzen notwendig. Laut vorgängiger Befragungen von Landwirt:innen wird in BFF mit dem Flex-Schnittregime je nach Bedingungen bereits Mitte Mai gemäht.

Eine weniger entwickelte Vegetation hatte aber auch seine Vorteile. Bei einem Feld mit hoher Vegetation war die Sicht auf die Moose meist eingeschränkt. Das Untersuchungsquadrat drückte die Vegetation oft etwas platt, was die Messung der Moosquadrate erschwerte. Um Verzerrungen zu minimieren, wurde das Untersuchungsquadrat möglichst gerade auf die Vegetation gelegt. Ansonsten war die Methode zur Erhebung der Moosquadrate, nach Braun-Blanquet et al. (1932) schnell und einfach durchzuführen und

ermöglicht eine direkte Erkennung von Moosteppichen, die die Vegetation beeinflussen können. Die Methode bietet einen ersten Eindruck über den Einfluss des Moores auf die Vegetationsdynamik. Die Punkt-Frequenz-Methode nach Goodall (1951) welche zur Ermittlung der Moosfrequenz genutzt wurde, liefert hingegen eine objektivere und genauere Häufigkeit der absoluten Moospräsenz. Sie ist jedoch zeitaufwändiger und erfordert gleichmässiges, wiederholtes und präzises Arbeiten. Zudem wurden nur punktuelle Erfassungen vorgenommen, was bei inhomogenen Verteilungen der Moose zu Verzerrungen führen kann. Ausserdem ist auch bei dieser Methode die Erhebung der Moosfrequenz bei hoher und dichter Vegetation schwierig. Jedoch konnte hier die Vegetation zur Seite geschoben werden, um die Sicht auf die in den Boden gesteckte Stricknadel zu verbessern und so eine genauere Messung der Moosfrequenz zu erhalten.

Neben der Vegetation wurde auch das Terrain betrachtet. Die grossflächige Terrainform wurde durch die Variable Geländemorphologie erfasst und in sechs Kategorien unterteilt. Eine Mulde oder Kuppe konnte jedoch an verschiedenen Hangbereichen auftreten, was nicht unterschieden wurde. Es wäre sinnvoll gewesen, die Variable Geländemorphologie in zwei unterschiedliche Variablen zu unterteilen: einerseits den Standort im Hang und andererseits den Geländeverlauf – ob die Fläche konvex, konkav oder flach verläuft. Der Standort im Hang ist aufgrund der Hydrologie, des Randeffekts sowie der Bewirtschaftung relevant (Richner et al., 2014), während die Terrainform zusätzlich aufgrund des Mikroklimas und der Lichtverfügbarkeit wichtig ist (Liu et al., 2020). Es könnte zudem vermerkt werden, welche Nutzung oberhalb der Fläche stattfindet, da der Randeffekt eines angrenzenden Waldes sich von dem einer intensiv genutzten Kunstwiese unterscheidet.

Neben den grossflächigen Terrainformen gab es auch kleine Unregelmässigkeiten des Terrains. Diese Unregelmässigkeiten konnten Messfehler verursachen. Bspw. zeigt Abbildung 32 eine Bodenvertiefung innerhalb des Untersuchungsquadrats. Diese Bodenvertiefung vergrössert die gesamte Fläche des Quadrats und erschwert insbesondere die Messgenauigkeit der Variable Moosquadrat. Bei Möglichkeit wurde versucht solche unregelmässigen Bodenstellen zu umgehen.



Abbildung 32: Bodenvertiefung innerhalb des Untersuchungsquadrats, wobei durch die Stricknadel der Höhenunterschied zwischen umliegendes Terrain und Bodenvertiefung erkennbar wird. | Quelle: eigene Aufnahme vom 30. Mai 2024

Zur Berechnung der Sonneneinstrahlung wurde ein digitales Oberflächenmodell (DOM) benötigt, das jedoch für die Region Entlebuch nicht öffentlich zur Verfügung stand. Daher musste selbst ein stark vereinfachtes DOM erstellt werden. Dieses Modell basierte nur auf einem digitalen Höhenmodell (DHM) und einer Standard-Baumhöhe bei Baumvegetation. Im Vorfeld wurde zusätzlich die Verwendung eines Sonnenkompasses zur Erhebung der Sonneneinstrahlung getestet. Da dieses Instrument jedoch auf Waldlandschaften ausgerichtet ist, erwies sich diese Methode als ungenau (Herzog, 2019). Für zukünftige Forschung wird empfohlen, entweder ein detailliertes DOM zur Berechnung der Sonneneinstrahlung zu verwenden oder alternative Methoden, ähnlich zum Sonnenkompass, in Betracht zu ziehen.

Ein weiteres Problem war die teilweise unzureichende GPS-Genauigkeit, die die Standortbestimmung erschwerte. Um diese Ungenauigkeiten zu minimieren, wurden Standortkontrollen anhand von Luftbildern durchgeführt. Die horizontale 2D-Darstellung der LN auf Karten beeinträchtigte insbesondere in steileren Lagen die Bestimmung der Fläche sowie die GPS-Genauigkeit. Steile Flächen erschienen auf den 2D-Karten kleiner, was zu ungenaueren Standortbestimmungen führte und möglicherweise die digital erhobenen Variablen verfälschte.

4.5.2 Modellierung und Datenanalyse

Die Moosdeckung wurde durch die Variable Moosquadrate mit einer Skala von null bis 81 und der Variable Moosfrequenz mit einer Skala von null bis 100 erhoben. Aufgrund der unterschiedlichen Skalen

wäre es sinnvoll gewesen, diese zu Beginn in Prozentsätze der Moosdeckung im Untersuchungsquadrat umzurechnen und ausschliesslich mit den Prozentwerten weiterzuarbeiten. Bei der deskriptiven Statistik konnte dies nachträglich noch angepasst werden. Bei den Modelldaten war dies nicht mehr möglich und verschlechterte daher deren Vergleichbarkeit.

Weiter wurde die Suche nach dem besten Modell mittels schrittweiser Regression und der Test-Train-Split-Methode durchgeführt. Alternative Methoden, wie bspw. LASSO (Least Absolute Shrinkage and Selection Operator), wurden nicht getestet (Stahel, 2017). Ähnlich zur schrittweisen Regression prüft LASSO, welche Variablen für das Modell relevant sind, um Overfitting und unnötige Komplexität zu vermeiden (Robeco, 2024).

Die Verwendung des Bayesian Information Criterion (BIC) anstelle des AIC zur Modellauswahl hätte zu Modellen mit weniger, aber relevanteren Variablen geführt. Dabei ist der BIC sinnvoller, um ein korrektes Modell zu selektionieren, wobei der AIC bevorzugt wird, um ein Vorhersagemodell zu wählen (Chakrabarti & Ghosh, 2011).

Das Gesamtmodell der Moosquadrante wies einen viel zu hohen Intercept Estimate (2484.7%) auf, was auf unzureichende Skalierung oder mögliche Ausreisser hindeuten könnte, obwohl die Variable skaliert, zentriert und transformiert wurde. Weiter waren die Referenzwerte der numerischen und kategoriellen Variablen nicht immer sinnvoll. Eine zusätzliche Box-Cox-Transformation, analog zur Moosfrequenz, führte zu einer schlechteren Modellgüte, weshalb diese wieder verworfen wurde. Zusätzlich konnte durch die Methodik der schrittweisen Regression eine Modellüberanpassung verhindert werden. Einzelne Ausreisser, unzureichende Datenpunkte oder fehlende Variablen könnten zu Verzerrungen geführt haben, wobei die genaue Ursache für die Unstimmigkeit nicht abschliessend geklärt werden konnte. Die übrigen Teilmodelle und Modell-Outputs erscheinen plausibel.

4.6 Zukünftige Forschungsansätze

Neben den erhobenen Variablen hätten noch zahlreiche weitere Variablen und Charakteristika der Flächen untersucht werden können. Aufgrund von Zeit- und Ressourcenbeschränkungen war dies leider nicht möglich. Zukünftige Forschung könnte folgende Aspekte zusätzlich in Betracht ziehen:

Neben den untersuchten EW und WiW wären weitere BFF-Typen, wie extensiv genutzte Weiden oder Streuflächen sowie intensiv genutzte Flächen als Kontrollgruppe, interessant. Auch das nicht untersuchte Schnittregime Staffelmahd oder die nicht untersuchten Höhenzonen könnten in zukünftigen Forschung miteinbezogen werden (Iawa, 2024c). Die verwendeten Maschinen und Handhabung des Schnittguts können die Bodeneigenschaften (Feige, 1982) sowie die Moosdeckung und Vegetationseigenschaften beeinflussen (Richner et al., 2014). Des Weiteren gibt es bei NHGF zusätzliche Anforderungen an das Management, welche mit zusätzlichen NHGF weiter untersucht werden können. Bei der Erhebung von NHGF durch den Kanton werden bereits Vegetations- und Bodeneigenschaften aufgenommen (Iawa, 2024d) und können bei ausreichender Datengrundlage für weitere Analysen miteinbezogen werden.

Neben den nicht betrachteten Managementstrategien wurden auch nicht alle Umweltfaktoren erhoben. Die Region Entlebuch ist bekannt für ihren lehmigen Boden (Schüpbach, 2002). Diese Charakteristik sowie weitere lokale Bodeneigenschaften beeinflussen die Hydrologie und die Konkurrenzkraft anderer Pflanzen und somit auch die Moosdeckung (Carroll et al., 2000; Guntern, 2016). Da Moose ihre Nährstoffe aus der Luft aufnehmen, wären Luftmessungen an jedem Standort über einen längeren Zeitraum sinnvoll gewesen (Schnyder & Bergamini, 2017; Wey, 2023). Luft- und Bodenparameter wurden in den Vorbereitungen der Arbeit aus der Methodik ausgeschlossen, da eine Eingrenzung der zeitlich möglichen

Erhebungen getroffen werden musste. Für eine ganzheitliche Analyse und ein tieferes Verständnis wären diese Parameter jedoch von hohem Interesse.

Die Vegetation beeinflusst das Mikroklima (Lichtenecker et al., 2003), weshalb eine umfassende Vegetationsaufnahme, Bestimmung des Wiesentyps und detaillierte Moosbestimmung für ein ganzheitlicheres Bild der Vegetationszusammensetzung und -dynamik wichtig gewesen wäre, aber auch einen wesentlich höheren Zeitaufwand und umfassendes Wissen in der Botanik beansprucht hätte. Dabei wären für die Vegetations- und Moosaufnahme zusätzlich zu der bewährten Methode nach Braun-Blanquet (1964) auch zusätzliche neuere Image-Analysis-Methoden, wie in Vanha-Majamaa et al. (2000) beschrieben, hilfreich.

Allgemein sollen durch zukünftige Untersuchungen weitere Einblicke in die Problematik der Vermoosung gewonnen werden. Aufgrund der hohen Relevanz der Umweltfaktoren ist eine ausführliche Untersuchung der begünstigenden Standorteigenschaften und Vegetationscharakteristika notwendig. Weiterhin ist eine standortangepasste Bewirtschaftung zur Minderung der übermässigen Moosdeckung wichtig. Dabei muss vorerst durch langfristige Untersuchungen und Tests auf einer Auswahl von Flächen die Reaktion der Moosdeckung auf unterschiedliche Umweltbedingungen, Bewirtschaftungsformen und Störungen untersucht werden. Dies würde ein grösseres Projekt über mehrere Jahre benötigen, ähnlich zur Studie in Briemle (1994). Empfehlenswert dabei ist, weitere Regionen der Schweiz zu betrachten, da die Problematik der Vermoosung ein schweizweit bekanntes Problem darstellt (Huguenin-Elie, 2024).

Zusammenfassen lässt sich sagen, dass die Moosdeckung auf extensiv genutzten Grünlandsystemen von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst werden kann. Im Rahmen dieser Arbeit konnte aus Zeit- und Ressourcengründen nicht alles erfasst werden, weshalb zukünftige Forschung mit Einbezug weiteren Umwelt- und Bewirtschaftungsfaktoren von Bedeutung sind. Eine umfassendere Analyse der Standorteigenschaften und Vegetationscharakteristika sowie eine langfristige Untersuchung der Reaktionen auf unterschiedliche Umweltbedingungen, Bewirtschaftungsformen und Störungen sind notwendig, um ein ganzheitliches Verständnis der Einflussfaktoren auf die Moosdeckung zu erlangen. Dies würde nicht nur zur wissenschaftlichen Erkenntnis beitragen, sondern auch praktische Empfehlungen für eine standortangepasste Bewirtschaftung zur Minderung der übermässigen Moosdeckung liefern.

5 Schlussfolgerung

Die Region Entlebuch verfügt durch ihr nasses und mildes Klima sowie den lehmigen Böden (Flysch) bereits auf regionaler Ebene über geeignete Umweltvoraussetzungen für diverse Moosarten. Weiter können lokale Umweltfaktoren wie Exposition und Vegetation die Moosdeckung beeinflussen. Nördlich ausgerichtete Standorte sowie Standorte mit einer geringeren Vegetationshöhe weisen eine erhöhte Moosdeckung auf. Auch die Geländemorphologie und Pflanzenfrequenz scheinen teilweise die Moosdeckung zu verändern, wobei die Einflüsse dieser Faktoren nicht eindeutig waren. Weiter zeigen die Teilmodelle, dass wenig intensiv bewirtschaftete Flächen eine geringere Moosdeckung aufweisen. Andere Bewirtschaftungsfaktoren wie die ökologische Qualität oder das Alter der BFF scheinen hingegen keine entscheidende Rolle zu spielen. In den Gesamtmodellen wird zudem ersichtlich, dass der einzige signifikante Bewirtschaftungsfaktor in den Teilmodellen – der Kulturtyp – durch Umweltvariablen übersteuert wird.

Je nach Bewirtschaftung und Umweltbedingungen ergibt dies in der UBE eine durchschnittliche, von oben sichtbare Moosdeckung (Moosquadrat) von 24.5% und eine Moosfrequenz von 50.4%. Dabei konnte ein breites Spektrum an vorhandener Moosdeckung untersucht werden. Je nach Definition kann bei 18% bis 46% der Untersuchungspunkte von einer Vermoosung gesprochen werden. Um die Zahl der vermoosten Standorte zu mindern, muss durch zukünftige Forschung und individuelle Analysen der einzelnen Flächen zuerst die geeignete Bewirtschaftung in Abhängigkeit der Umweltbedingungen eruiert werden. Gemäss Modellen kann durch eine leicht intensivere Bewirtschaftung die Moosdeckung nur leicht reduziert werden. Zusätzlich ist die Bewirtschaftung der Flächen gemäss Landwirt:innen nicht nur von den Umwelt- und Standortfaktoren, sondern auch von den bestehenden Auflagen für Direktzahlungen, dem Ertrag, der Erreichbarkeit und den finanziellen Mitteln abhängig.

Landwirt:innen wünschen sich grösseren Spielraum innerhalb des Direktzahlungssystems für eine individuellere, standortangepasste Bewirtschaftung. Es sind jedoch weitere Untersuchungen und Forschungsprojekte zur Thematik notwendig. Mittels experimenteller Ansätze kann eruiert werden, was unter einer standortangepassten Bewirtschaftung verstanden werden kann, um so neue Managementstrategien zu entwickeln. Längerfristige Beobachtungen der Reaktionen der Moosdeckung auf unterschiedliche Umweltbedingungen und Bewirtschaftungsformen können zusätzliche Einblicke in die Vegetationsdynamik und Vermoosungsprozesse bieten. Es bestehen viele Ungewissheiten über die Rolle der Moose in der Vegetationsdynamik. Die vorhandene Forschung deckt häufig nur spezifische Aspekte des Mooswachstums ab und bietet keine umfassenden Analysen der Wechselwirkungen und Konkurrenzverhältnisse in Grünlandökosystemen. Diese Lücke deutet darauf hin, dass zukünftige Studien notwendig sind, um die dynamischen Prozesse besser zu verstehen und stichhaltige Antworten auf grundlegende Fragen der Moos- und Pflanzeninteraktion zu liefern, speziell in Bezug auf die Landwirtschaft.

Die Problematik der Vermoosung auf extensiv bewirtschafteten Flächen ist schweizweit bekannt. Das hohe Interesse und die Hilfsbereitschaft der Landwirt:innen in der UBE verdeutlichen, dass die Landwirtschaft dieses Thema ernst nimmt. BFF wurden erst in den 1990er Jahren entwickelt, und die Vermoosung hat sich vermutlich erst über die Jahre hinweg allmählich ausgeprägt. Daher ist die Forschung zu diesem Thema noch begrenzt. Es ist von Bedeutung, dass dieses Thema weiter untersucht wird, um Lösungen zu finden, die sowohl den Anforderungen der Landwirtschaft als auch des Naturschutzes gerecht werden.

Danksagung

Die Erarbeitung der Masterarbeit war für mich eine spannende und lehrreiche Zeit, in der ich viele bereichernde Erfahrungen sammeln durfte. Ich hatte die Gelegenheit, die Region Entlebuch besser kennenzulernen und mit zahlreichen Personen in Kontakt zu treten sowie interessante Gespräche zu führen. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen Institutionen und Personen bedanken, die mich während meiner Arbeit unterstützt haben.

Im Folgenden möchte ich mich bei den Personen bedanken, die eine besonders wichtige Rolle gespielt haben und massgeblich zu meiner Masterarbeit beigetragen haben.

- Betreuung** Für die fachliche Unterstützung und Begleitung während der gesamten Arbeit möchte ich meinem Referenten Florian Knaus herzlich danken. Seine Unterstützung bei den fachlichen und organisatorischen Aspekten war von grossem Wert. Auch meiner Korreferentin Judith Stalder von der UNESCO Biosphäre Entlebuch gebührt ein grosses Dankeschön für ihre Unterstützung, insbesondere bei der Erarbeitung meiner Artenkenntnisse.
- Daten und Material** Mein Dank gilt der Dienststelle für Wald und Landwirtschaft, insbesondere Carol Federer, für die Bereitstellung der Daten. Ebenso danke ich der UNESCO Biosphäre Entlebuch für die Zurverfügungstellung der Daten und des Feldtablets.
- Feldarbeit** Mein herzlicher Dank gilt allen Bewirtschaftenden, die mir die Erlaubnis gegeben haben, ihre Flächen zu untersuchen und mir wertvolle Informationen zu den Eigenschaften und der Geschichte der Flächen zur Verfügung gestellt haben. Ein besonderes Dankeschön geht an die Landwirt:innen, die mich zu den schwer erreichbaren Flächen transportiert haben und mir so trotz der schlechten Wetterbedingungen die Aufnahme abgelegener Flächen ermöglichten.
Zudem danke ich Harald Reinert, Verena Reinert, Marco Reinert, Michela Ferrari und Pascal Bühlmann für ihre Unterstützung während der Feldarbeit. Ihre Hilfe war besonders wertvoll, da die Wetterbedingungen eine Durchführung der Arbeiten ohne ihre Unterstützung nahezu unmöglich gemacht hätten.
- Weitere Danksagung** Ein herzliches Dankeschön geht an meine Familie, Freunde und Mitstudierenden. Ihre emotionale Unterstützung während der gesamten Arbeit war von unschätzbarem Wert. Zudem danke ich ihnen für das Korrekturlesen meiner Arbeit sowie meinen Eltern für die Bereitstellung eines Autos und weiteren Materials.
- Technische Unterstützung** Für die sprachliche Überarbeitung, stilistische Verfeinerung und Unterstützung beim Coding in "R" habe ich KI-gestützte Tools, insbesondere ChatGPT von OpenAI, verwendet. Diese Unterstützung hat mir geholfen, die Lesbarkeit und Klarheit meines Textes zu verbessern und die Datenanalyse effizient durchzuführen.

Literaturverzeichnis

- AGRIDEA. (2024). *Überblick über die Biodiversitätsförderflächen und Nützlingsstreifen und ihre Beiträge*. Agrinatur, Lindau. https://www.agrinatur.ch/fileadmin/agribiodiv/documents/de/Beitraege_Biodiversitaetsfoerderflaechen_2024_2.pdf [Zugriff: 27.08.2024]
- Agroscope. (2024). *Ökologischer Ausgleich*. Agroscope. <https://www.agroscope.admin.ch/agroscope/de/home/themen/umwelt-ressourcen/biodiversitaet-landschaft/oekologischer-ausgleich/oekologischer-ausgleich.html> [Zugriff: 05.03.2024]
- Aldor-Noiman, S., Brown, L. D., Buja, A., Rolke, W., & Stine, R. A. (2013). The Power to See: A New Graphical Test of Normality Statistical Computing and Graphics. *The American Statistician*, 67(4), S. 249–260. <https://doi.org/10.1080/00031305.2013.847865>
- Armstrong, R. A. (2014). When to use the Bonferroni correction. *Ophthalmic & physiological optics : the journal of the British College of Ophthalmic Opticians (Optometrists)*, 34(5), S. 502–508. <https://doi.org/10.1111/OPO.12131>
- Arróniz-Crespo, M., Leake, J. R., Horton, P., & Phoenix, G. K. (2008). Bryophyte physiological responses to, and recovery from, long-term nitrogen deposition and phosphorus fertilisation in acidic grassland. *New Phytologist*, 178(4), S. 864–874. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02617.x>
- Aude, E., & Ejrnæs, R. (2005). Bryophyte colonisation in experimental microcosms: The role of nutrients, defoliation and vascular vegetation. *Oikos*, 109(2), S. 323–330. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13268.x>
- Auguie, B. (2017). *gridExtra: Miscellaneous Function for «Grid» Graphics* (R package version 2.3). <https://www.rdocumentation.org/packages/gridExtra/versions/2.3> [Zugriff: 24.06.2024]
- BAFU. (2022). *Trockenwiesen und -weiden*. Bundesamt für Umwelt. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/oekologische-infrastruktur/biotop-von-nationaler-bedeutung/trockenwiesen-und--weiden.html> [Zugriff: 07.03.2024]
- Barto, K. (2024). *MuMIn: Mult-Model Inference* (R package version 1.48.4). <https://www.rdocumentation.org/packages/MuMIn/versions/1.48.4> [Zugriff: 24.06.2024]
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., Walker, S., Bojesen Christensen, R. H., Singmann, H., Dai, B., Scheipl, F., Grothendieck, G., Green, P., Fox, J., Bauer, A., Krivitsky, P. N., Tanaka, E., & Jagan, M. (2024). *lme4: Linear Mixed-Effects Models using «Eigen» and S4* (R package version 1.1-35.4).
- Baur, P. T. (1999). *Agrarstrukturwandel in der Schweiz* [Doktorarbeit]. ETH Zürich.
- Benz, R., Bischoff, W., Bui, B., Dani, L., Eggenberger, S., Fornax, Gérard, N., Krebs, A., Mähl, A., Peupleloup, Ramsay, S., Rohner, U., & Schiess, H. (2018). *Biodiversitätsförderflächen (BFF) Zeigerpflanzen von extensiv genutzten Wiesen, wenig intensiv genutzten Wiesen und Streuflächen für die Alpennordseite*. AGRIDEA, Lausanne.
- Bergamini, A., & Pauli, D. (2001). Effects of increased nutrient supply on bryophytes in montane calcareous fens. *Journal of Bryology*, 23(4), S. 331–339. <https://doi.org/10.1179/jbr.2001.23.4.331>
- Bergamini, A., Pauli, D., Peintinger, M., & Schmid, B. (2001). Relationships between productivity, number of shoots and number of species in bryophytes and vascular plants. *Journal of Ecology*, 89(6), S. 920–929. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2001.00613.x>

- Bergamini, A., Peintinger, M., Schmid, B., & Urmi, E. (2001). Effects of management and altitude on bryophyte species diversity and composition in montane calcareous fens. *Flora*, 196(3), S. 180–193. [http://dx.doi.org/10.1016/S0367-2530\(17\)30040-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0367-2530(17)30040-3)
- BFS. (2018). Arealstatistik nach Standardnomenklatur NOAS04. In *Bundesamt für Statistik* (GIS-Datensatz). ETH Zürich, GeoVITE.
- BLW. (2020). *Weisungen nach Artikel 59 und Anhang 4 der Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV) vom 23. Oktober 2013, SR 910.13; Extensiv genutzte Wiesen, wenig intensiv genutzte Wiesen und Streuflächen der Qualitätsstufe II*. www.blw.admin.ch Januar 2020
- BLW. (2023a). *Biodiversitätsbeiträge*. Bundesamt für Landwirtschaft. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/instrumente/direktzahlungen/biodiversitaetsbeitraege.html#collapseSubNav> [Zugriff: 06.03.2024]
- BLW. (2023b). *Direktzahlungen*. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern. <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/instrumente/direktzahlungen.html> [Zugriff: 19.04.2024]
- BLW. (2024). *Karte der landwirtschaftlichen Zonengrenzen der Schweiz*. Bundesamt für Landwirtschaft. https://map.geo.admin.ch/?topic=blw&lang=de&bgLayer=ch.swisstopo.pixelkarte-farbe&catalogNodes=887,947&layers=ch.blw.landwirtschaftliche-zonengrenzen&layers_opacity=0.75 [Zugriff: 18.04.2024]
- Boch, S., Allan, E., Humbert, J. Y., Kurtogullari, Y., Lessard-Therrien, M., Müller, J., Prati, D., Rieder, N. S., Arlettaz, R., & Fischer, M. (2018). Direct and indirect effects of land use on bryophytes in grasslands. *Science of the Total Environment*, 644(1), S. 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.06.323>
- Bohner, A. (2015). Zur Bedeutung von Zeigerpflanzen im Grünland. *Alpenländisches Expertenforum*, 2(1), S. 39–44.
- Bohner, A., Öhlinger, R., & Tomanova, O. (2006). Auswirkungen der Grünlandbewirtschaftung und Flächenstilllegung auf Vegetation, Boden, mikrobielle Biomasse und Futterqualität. *Die Bodenkultur*, 57(1), S. 33–45. <https://www.researchgate.net/publication/288785050> [Zugriff: 10.04.2024]
- Box, G. E. P., & Cox, D. R. (1964). An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, 26(2), S. 211–243. <https://doi.org/10.1111/J.2517-6161.1964.TB00553.X>
- Braun-Blanquet, J. (1964). *Pflanzensoziologie* (3. Aufl.). Springer, Wien. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2>
- Braun-Blanquet, J., Fuller, G., & Conard, H. S. (1932). *Plant Sociology; The Study of Plant Communities* (1. Aufl.). Marine Biological Laboratory, New York.
- Breunig, T. (2004). *Ökologische Wirkung von PLENUM-Projekten*. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Karlsruhe.
- Briemle, G. (1994). *Extensivierung einer Fettwiese und deren Auswirkung auf die Vegetation. Ergebnisse eines Freilandversuchs*. Infodienst Landwirtschaft- Ernährung- Ländlicher Raum, Karlsruhe.
- Briemle, G., Elsässer, M., & Hess, R. (1998). Versuche zur Möglichkeit der Moosverdrängung auf Extensiv-Grünland durch unterschiedliche Düngung. *Infodienst Landwirtschaft - Ernährung - Ländlicher Raum*, 5(11). <https://www.landwirtschaft-bw.de/,Lde/644515> [Zugriff: 05.03.2024]

- Bühler, J. (1940). Das Entlebuch im Wandel der Zeit. *Schweizerische Zeitschrift für Vermessungswesen und Kulturtechnik*, 38(11), S. 221–235. <https://doi.org/10.5169/seals-198532>
- Carroll, J. A., Johnson, D., Morecroft, M., Taylor, A., Caporn, S. J. M., & Lee, J. A. (2000). The effect of long-term nitrogen additions on the bryophyte cover of upland acidic grasslands. *Journal of Bryology*, 22(2), S. 83–89. <https://doi.org/10.1179/jbr.2000.22.2.83>
- Chakrabarti, A., & Ghosh, J. K. (2011). AIC, BIC and recent advances in model selection. In *Philosophy of Statistics* (7. Aufl., Bd. 7, S. 583–605). Elsevier B. V, Amsterdam.
- Chevillat, V., Stöckli, S., Birrer, S., Jenny, M., Graf, R., Pfiffner, L., & Zellweger-Fischer, J. (2017). Mehr und qualitativ wertvollere Biodiversitätsförderflächen dank Beratung. *Agrarforschung Schweiz*, 8(6), S. 232–239.
- Ellenberg, H., & Leuschner, C. (2010). *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen* (6. Aufl.). Ulmer-Verlag. <https://www.oekologie-seite.de/index.php?id=24&pid=4016> [Zugriff: 13.06.2024]
- Esri Inc. (2021). *ArcGIS Pro* (2.9.0). Esri Inc.
- Esri Inc. (2024a). *ArcGIS Online* (10.9). Environmental Systems Research Institute. <https://www.esri.com/de-de/arcgis/products/arcgis-online/overview> [Zugriff: 18.04.2024]
- Esri Inc. (2024b). *Points Solar Radiation (Spatial Analyst)*. ArcGIS Pro 3.3. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/points-solar-radiation.htm> [Zugriff: 26.08.2024]
- Federer, C. (2024). Persönliche Kommunikation. In *E-Mail vom 13.08.2024*.
- Feige, G. B. (1982). FID Biodiversitätsforschung: Bioindikatoren. *Decheniana*, 26(1), S. 23–30.
- Fergus, A. J. F., Gerighausen, U., & Roscher, C. (2017). Vascular plant diversity structures bryophyte colonization in experimental grassland. *Journal of Vegetation Science*, 28(5), S. 903–914. <https://doi.org/10.1111/jvs.12563>
- Fox, J. (2023). *car: Companion to Applied Regression* (R package version 3.1-2). <https://www.rdocumentation.org/packages/car/versions/3.1-2> [Zugriff: 24.06.2024]
- Frahm, J.-P., & Frey, W. (2004). *Moosflora* (4. Aufl.). Ulmer, Wien.
- Frost, I. (2018). *Einfache lineare Regression - Die Grundlage für komplexe Regressionsmodelle verstehen* (1. Aufl.). Springer, München.
- Giuliana, G. (2019). Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)- Annual Mean- Switzerland. In *SwissEnvEO* (GIS-Datensatz). Université de Genève. <https://geonetwork.swissdatacube.org/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/ddd5e734-1f1a-4e06-9402-7041ec625119> [Zugriff: 06.05.2024]
- Goodall, D. W. (1951). *Some Consideration in the Use of Point Quadrats for the Analysis of Vegetation*. Botany School University of Melbourne, Melbourne.
- Google LLC. (2024). *Zufallsgenerator*. Alphabet Inc. https://www.google.com/search?q=zufallsgenerator&rlz=1C1CHBF_deCH1073CH1073&oq=zufallsgenerator&gs_lcrp=EgZjaHJvbWUqDggAEEU-YJxg7GIAEGloFMg4IABBFgCcYOxiABBiKBTIOCAEQRRgnGDSYgAQYigUyBwgCEAAyGAQyBwgDE-AAYgAQyDQgEEAAygwEYsQMYgAQyBwgFEAAyGAQyBwgGEAAyGAQyBwgHEAAyGAQyBwgIEAAyJwlyBwgJEAAYjwLSAQgxOTgxajBqNKgCALACAQ&sourceid=chrome&ie=UTF-8 [Zugriff: 17.04.2024]

- Granados-Ramírez, R., Reyna-Trujillo, T., Gómez-Rodríguez, G., & Soria-Ruiz, J. (2004). Analysis of NOAA-AVHRR-NDVI images for crops monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 25(9), S. 1615–1627. <https://doi.org/10.1080/0143116031000156855>
- Guntern, J. (2016). *Eutrophierung und Biodiversität. Auswirkungen und mögliche Stossrichtungen für Massnahmen im Kanton Zürich*. Fachstelle Naturschutz Kanton Zürich, Zürich.
- Häne, K. (2017). *Die Fichte (Picea abies)*. WSL. <https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/baeume-und-waldpflanzen/nadelbaeume/die-fichte-picea-abies> [Zugriff: 22.3.2024]
- Hanson, G., Elsässer, M., & Martin, W. (1998). *Unkrautproblematik extensiver Bergweiden im Südschwarzwald*. 4. Alpländisches Expertenforum, S. 9-14.
- Hanson, H. C. (1950). Ecology of the Grassland. *The Botanical Review*, 16(6), S. 283–360.
- Hemmerich, W. A. (2024). *Binomiale logistische Regression: Minimale Stichprobengrösse*. StatistikGuru. <https://statistikguru.de/spss/binomiale-logistische-regression/minimale-stichprobengroesse.html> [Zugriff: 02.04.2024]
- Herzog. (2019, August). *Sonnenkompass*. Herzog Forsttechnik AG. https://www.herzog-forsttechnik.ch/wp-content/uploads/2019/08/Sonnenkompass_Flyer.pdf [Zugriff: 27.08.2024]
- Hobbs, R. J., & Mooney, H. A. (1990). Remote Sensing of Spatial and Temporal Dynamics of Vegetation. In R. J. Hobbs (Hrsg.), *Remote Sensing of Biosphere Functioning* (1. Aufl., Bd. 79, S. 203–219). Springer, New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3302-2_10 [Zugriff: 29.07.2024]
- Huguenin-Elie, O. (2024). Persönliche Kommunikation. In *Gespräch vom 16.05.2024*.
- Humbert, J.-Y., Buri, P., Unternährer, D., & Arlettaz, R. (2018). Alternative Mähregimes zur Förderung der Artenvielfalt von Wiesen. *Agrarforschung Schweiz*, 9(9), S. 314–321.
- InfoFlora. (2018a). *Clinopodium vulgare L. (Wirbeldost)*. Flora Helvetica. <https://www.infoflora.ch/de/flora/clinopodium-vulgare.html> [Zugriff: 29.07.2024]
- InfoFlora. (2018b). *Leucanthemum vulgare Lam. (Gewöhnliche Wiesen-Margerite)*. Flora Helvetica. <https://www.infoflora.ch/de/flora/leucanthemum-vulgare.html> [Zugriff: 29.07.2024]
- InfoFlora. (2018c). *Fagus sylvatica L.* Flora Helvetica. <https://www.infoflora.ch/de/flora/fagus-sylvatica.html> [Zugriff: 19.04.2024]
- Jeschke, M. (2008). *Einfluss von Renaturierungs- und Pflegemassnahmen auf die Artendiversität und Artenzusammensetzung von Gefässpflanzen und Kryptogamen in mitteleuropäischen Kalkmagerrasen* [Doktorarbeit]. Technische Universität München.
- Jeyakumar, S. P., Dash, B., Singh, A. K., Suyal, D. C., Soni, & R. (2020). Nutrient Cycling at Higher Altitudes. In *Microbiological Advancements for Higher Altitude Agro-Ecosystems & Sustainability. Rhizosphere Biology* (1. Aufl., Bd. 13, S. 293–305). Springer, Singapore. <http://www.springer.com/series/15861> [Zugriff: 27.07.2024]
- Kaufmann, S., & Berg, C. (2014). Bryophyte Ecology and Conservation in the Troodos Mountains, Cyprus. *Herzogia*, 27(1), S. 165–187. <https://doi.org/10.13158/heia.27.1.2014.165>
- KBNL. (2024). *Inside - Natur Landschaft*. Konferenz der Beauftragten für Natur- und Landschaftsschutz, Herisau.

- Khanna, S. (2024). *A Comprehensive Guide to Train-Test-Validation Split in 2024*. Analytics Vidhya. <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2023/11/train-test-validation-split/> [Zugriff: 05.07.2024]
- Knaus, F. (2011). *Monitoring der Natur und Landschaft in der UNESCO Biosphäre Entlebuch*. UNESCO Biosphäre Entlebuch, Schüpfheim. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010745696>
- Knaus, F. (2023). Persönliche Kommunikation. In *Gespräch vom 20.09.2023*.
- Kohn, W., & Öztürk, R. (2022). Normalverteilung. In *Statistik für Ökonomen: Datenanalyse mit R und SPSS* (4. Aufl.). Springer, Berlin. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-64754-7>
- lawa. (2019). *Hinweise für Bewirtschafter in Vernetzungsprojekten*. Dienststelle für Landwirtschaft und Wald Kanton Luzern, Sursee. https://lawa.lu.ch/download/download_landwirtschaft/download_biodiversitaetsfoerderflaechen [Zugriff: 07.03.2024]
- lawa. (2024a). Biodiversitätsförderflächen in der UNESCO Biosphäre Entlebuch. In *Dienststelle für Landwirtschaft und Wald Kanton Luzern* (GIS-Datensatz). Dienststelle für Landwirtschaft und Wald Kanton Luzern.
- lawa. (2024b). LAWIS-Auszug alle Parzellen mit Adressdetails der Bewirtschafter in der UNESCO Biosphäre Entlebuch. In *Dienststelle für Landwirtschaft und Wald Kanton Luzern*. Federer Carol.
- lawa. (2024c). LAWIS-Auszug aller Biodiversitätsförderflächen in der UNESCO Biosphäre Entlebuch. In *Dienststelle für Landwirtschaft und Wald Kanton Luzern*. Federer Carol.
- lawa. (2024d). LAWIS-Auszug Naturschutzverträge in der UNESCO Biosphäre Entlebuch. In *Dienststelle für Landwirtschaft und Wald Kanton Luzern*. Federer Carol.
- lawa. (2024e). *Naturschutz*. Dienststelle für Landwirtschaft und Wald Kanton Luzern. https://lawa.lu.ch/Landwirtschaft/Direktzahlungen_und_Beitraege/Biodiversitaetsbeitraege/Naturschutz [Zugriff: 05.03.2024]
- Lichtenecker, A., Bassler, G., & Karrer, G. (2003). Klassifikation der Wirtschaftswiesen (Arrhenatheretalia) im Zentralraum des Waldviertels. *Wiss. Mitt. Nidderoesterr. Landesmuseum*, 15(1), S. 49–84. <https://www.researchgate.net/publication/288128937> [Zugriff: 10.04.2024]
- Liu, Y., Du, J., Xu, X., Kardol, P., & Hu, D. (2020). Microtopography-induced ecohydrological effects alter plant community structure. *Geoderma*, 362(1). <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114119>
- Lüdecke, D. (2024). *performance: Test if your model is a good model!* (R package version 0.12.0). <https://www.rdocumentation.org/packages/performance/versions/0.11.0> [Zugriff: 24.06.2024]
- LUSTAT. (2021). *Bodennutzung nach Nutzungsarten 1980/1982, 1993/1994, 2006/2007, 2015/2016*. Statistik Luzern. https://www.lustat.ch/files ftp/daten/arlu/09/w022_001t_arlu09_ss_d_0000.html [Zugriff: 15.04.2024]
- LUSTAT. (2023a). *Beschäftigte nach Geschlecht, Wirtschaftssektoren und privatem/öffentlichem Sektor seit 2005*. Statistik Luzern. https://www.lustat.ch/files ftp/daten/arlu/09/w032_041t_arlu09_zz_d_0000_002_188.html [Zugriff: 15.04.2024]
- LUSTAT. (2023b). *Ständige und mittlere Wohnbevölkerung seit 1981*. Statistik Luzern. https://www.lustat.ch/files ftp/daten/arlu/09/w012_010t_arlu09_zz_d_0000_001_008.html [Zugriff: 17.04.2024]
- Machatschek, M. (2017). Bewirtschaftung von Magerwiesen. *Der Alm- Bergbauer*, 7(6), 13–16.

- Mag, Univ.-D., Zechmeister, H. G., & Tribsch, M. A. (2002). «Ohne Moos nix los!» Die Moosflora von Linz. *ÖKO-L*, 24(1), S. 24–32. www.biologiezentrum.at [Zugriff: 07.08.2024]
- meteoblue. (2024). *Simulierte historische Klima- und Wetterdaten für Entlebuch*. meteoblue. https://www.meteoblue.com/de/wetter/historyclimate/climatemodelled/entlebuch_schweiz_2660887 [Zugriff: 29.07.2024]
- Müller, J., Klaus, V. H., Kleinebecker, T., Prati, D., Hölzel, N., & Fischer, M. (2012). Impact of land-use intensity and productivity on bryophyte diversity in agricultural grasslands. *PLoS ONE*, 7(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0051520>
- Naturschutz. (2019). *Karte der Schutzgebiete der Schweiz*. Das Schweizer Portal für Natur- und Umweltschutz. <https://naturschutz.ch/tipps/erleben/karte-der-naturschutzgebiete-der-schweiz/138788> [Zugriff: 10.04.2024]
- PlantNet. (2024). *PlantNet Plant Identification* (Mobile application software 3.19.3). PlantNet. <https://identify.plantnet.org/> [Zugriff: 20.06.2024]
- R Core Team. (2023). R: A language and environment for statistical computing. In *R Foundation for Statistical Computing* (4.3.1). R Foundation for Statistical Computing. <https://www.r-project.org/> [Zugriff: 18.04.2024]
- Rachoud-Schneider, A.-M., Leonhard, M., Schnyder, A., Baumann, W., & Moser, P. (2007). *Landwirtschaft*. Historisches Lexikon der Schweiz (HLS). <https://hls-dhs-dss.ch/de/articles/013933/2007-11-19/#H19.-20.Jahrhundert> [Zugriff: 15.04.2024]
- Reck, H. (2013, Dezember). Die ökologische Notwendigkeit zur Wiedervernetzung und Anforderungen an deren Umsetzung. *Natur und Landschaft*, S. 486–496. <https://shop.kohlhammer.de/die-okologische-notwendigkeit-zur-wiedervernetzung-und-anforderungen-an-deren-umsetzung-978-3-00-153244-2.html> [Zugriff: 31.07.2024]
- Regmi, N. R., McDonald, E. V., & Rasmussen, C. (2019). Hillslope response under variable microclimate. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(13), S. 2615–2627. <https://doi.org/10.1002/esp.4686>
- Richner, N., Durocher, L., Rohrer, H., & Walther, T. (2014). Heubläser als Alternative zum Heurechen: Einfluss auf die Vegetation nach vier Jahren. *Agrarforschung Schweiz*, 5(5), S. 188–195.
- Ripley, B. (2024). MASS: Support Functions and Datasets for Venables and Ripley's MASS. In *R package version 7.3.61* (R package version 7.3.61). <https://www.rdocumentation.org/packages/MASS/versions/7.3-61> [Zugriff: 19.07.2024]
- Robeco. (2024). *Quantitative investing - LASSO regression*. Robeco Schweiz Ltd. <https://www.robeco.com/de-ch/glossar/quantitative-investing/lasso-regression> [Zugriff: 05.08.2024]
- Sadava, D., Hillis, D. M., Heller, H. C., Hacker, S. D., & Markl, J. (2019). *Purves Biologie* (10. Aufl.). Springer, Mainz. <https://lehrbuch-biologie.springer.com/purves-biologie#glossar> [Zugriff: 08.03.2024]
- Schmidt, C., Bertschinger, I., Frei, P., Schaerer, J., & Zumbunn, S. (2016). *Moorhabitate der UNESCO Biosphäre Entlebuch im Wandel des Klimas* [Projektarbeit]. Universität Bern.
- Schnyder, N., & Bergamini, A. (2017). *Moose*. Verein Biodivers, Zürich. <https://biodivers.ch/de/index.php/Moose> [Zugriff: 28.08.2024]
- Schüpbach, U. (2002). *Ein Lebensraum im Spannungsfeld von Schutzgedanke und Nutzung* (Diplomarbeit). Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät der Universität Bern.

- Schweizer Pärke. (2024). *UNESCO Biosphäre Entlebuch*. Netzwerk Schweizer Pärke. https://www.parks.swiss/de/die_schweizer_paerke/parkportraits/unesco_biosphaere_entlebuch.php [Zugriff: 17.04.2024]
- Setzepfand, M. (2001). *Die epiphytische und lianoide Vegetation auf Weinmannia racemosa in warmtemperaten Regenwäldern in Camp Creek, Zentral-Westland, Südinsel, Neuseeland* [Doktorarbeit]. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.
- Signorell, A. (2024). *DescTools: Tools for Descriptive Statistics* (R package version 0.99.54). <https://andri-signorell.github.io/DescTools/> [Zugriff: 24.06.2024]
- Slack, N. G. (1984). A New Look at Bryophyte Community Analysis: Field and Statistical Methods. *Journal of the Hattori Botanical Laboratory*, 55, S. 113–132.
- Spektrum. (2001). Normalized Difference Vegetation Index. In *Lexikon der Kartographie und Geomatik*. <https://www.spektrum.de/lexikon/kartographie-geomatik/normalized-difference-vegetation-index/3640> [Zugriff: 15.05.2024]
- Stahel, W. (2017). *Statistische Regressionsmodelle Teil I: Lineare Regression*. Seminar für Statistik, ETH Zürich.
- swissbryophytes. (2024). *Moose*. Institut für Systematische und Evolutionäre Botanik. <https://www.swissbryophytes.ch/index.php/de/moose> [Zugriff: 17.04.2024]
- swisstopo. (2023). swissALTI3D. In *Bundesamt für Landestopografie (GIS-Datensatz)*. ETH Zürich, Geovite. <https://www.swisstopo.admin.ch/de/hoeihenmodell-swissalti3d> [Zugriff: 19.4.2024]
- Trommler, K., Plieninger, T., Bieling, C., Holger, G., Ohnesorge, B., Schaich, H., Schleyer Christian, & Wolff, F. (2013). *Ökosystemleistungen. Landnutzung, Lebensqualität und marktbasierete Instrumente in land- und forstwirtschaftlich genutzten Kulturlandschaften*. Berlin-Brandenburgerische Akademie der Wissenschaften, Berlin.
- UBE. (2024a). Auszug der UBE gemeldete vermooste Landwirtschaftsflächen. In *UNESCO Biosphäre Entlebuch*. Knaus Florian.
- UBE. (2024b). *Entlebucher Landschaft*. UNESCO Biosphäre Entlebuch. <https://www.biosphaere.ch/de/unesco-biosphaere-a-z/natur-landschaft/landschaften/entlebucher-landschaft/> [Zugriff: 10.04.2024]
- UBE. (2024c). *UNESCO Biosphäre Entlebuch - VISIONÄR. NATÜRLICH*. UNESCO Biosphäre Entlebuch. <https://www.biosphaere.ch/de/> [Zugriff: 20.03.2024]
- Urmi, E., Schubiger-Bossard, C., Schnyder, N., Müller, N., Kuchler, M., Hofmann, H., & Bisang, I. (2007). *Zwei Jahrhunderte Bestandesentwicklung von Moosen in der Schweiz: Retrospektives Monitoring für den Naturschutz* (Bd. 18). Haupt Verlag, Bristol-Stiftung, Zürich. www.bristol-stiftung.ch [Zugriff: 15.04.2024]
- van Klink, R., Boch, S., Buri, P., Rieder, N. S., Humbert, J. Y., & Arlettaz, R. (2017). *No detrimental effects of delayed mowing or uncut grass refuges on plant and bryophyte community structure and phytomass production in low-intensity hay meadows*. *Basic and Applied Ecology* (20). <https://doi.org/10.1016/j.baee.2017.02.003>
- Vanha-Majamaa, I., Salemaa, M., Tuominen, S., & Mikkola, K. (2000). Digitized photographs in vegetation analysis - a comparison of cover estimates. *Applied Vegetation Science*, 3(1), S. 89–94. <https://doi.org/10.2307/1478922>

- Wagner, G., Gygax, A., & Lauber, K. (2023). *Flora Helvetica Pro Deutsch* (Mobile application software 2.4.9). Haupt Verlag AG.
- Walter, H. (2022). Rückblick auf die Agrarreform in den 90er und Situation heute. *Agrarpolitikforum - HAFL Zollikofen*, 1.
- Walter, T., Schneider, K., & Gonseth, Y. (2007). Schnittzeitpunkt in Ökowieden: Einfluss auf die Fauna. *AGRARForschung*, 14(3), S. 114–119.
- Walther, B. (2022, Dezember 9). *Spearman-Korrelationskoeffizient in R berechnen*. <https://bjoernwalther.com/spearman-korrelationskoeffizient-in-r-berechnen/> [Zugriff: 24.06.2024]
- Walther, B. (2023, August 16). *Mann-Whitney-U-Test/Wilcoxon-Test in R rechnen*. <https://bjoernwalther.com/mann-whitney-u-test-wilcoxon-test-in-r-rechnen/> [Zugriff: 24.06.2024]
- Walther, B. (2024, Juni 11). *Kruskal-Wallis-Test in R rechnen*. <https://bjoernwalther.com/kruskal-wallis-test-in-r-rechnen/> [Zugriff: 24.06.2024]
- Weber, S. (2024). *Landwirtschafts-Informationssystem (LAWIS)*. SOFTEC AG. <https://www.softec.ch/projekte/landwirtschafts-informationssystem/> [Zugriff: 20.08.2024]
- Werner, J., Salazar-Cubillas, K., Perdana-Decker, S., Obermeyer, K., Velasco, E., Hart, L. & Dickhoefer, U. (2024). Development of a Robust Sensor Calibration for a Commercially Available Rising Platemeter to Estimate Herbage Mass on Temperate Seminatural Pastures. *Sensors*, 24(7), 1–18. <https://doi.org/10.3390/s24072326>
- Wey, H. (2023). *Messbericht Ammoniak*. inNET Monitoring AG, Luzern.
- Wickham, H. (2024). *tidyr: Tidy Messy Data* (R package version 1.3.1). <https://tidyr.tidyverse.org/> [Zugriff: 06.08.2024]
- Wickham, H., Chang, W., Henry, L., Lin Pedersen, T., Takahashi, K., Wilke, C., Woo, K., Yutani, H., Dunnington, D., & van den Brand, T. (2016). *ggplot: Create Elegant Data Visualisations Using the Grammar of Graphics* (R package version 3.5.0). <https://ggplot2.tidyverse.org/> [Zugriff: 24.06.2024]
- Wickham, H., Francois, R., Henry, L., Müller, K., & Vaughan, D. (2023). *dplyr: A Grammar of Data Manipulation* (R package version 1.1.4). <https://dplyr.tidyverse.org/> [Zugriff: 24.06.2024]
- Wigger, B. (2024). Persönliche Kommunikation. In *Gespräch vom 27.03.2024*.
- Wirth, V. (2010). Ökologische Zeigerwerte von Flechten- erweiterte und aktualisierte Fassung. *Herzogia*, 23(2), S. 229–248. <https://www.researchgate.net/publication/235710596> [Zugriff: 09.04.2024]
- Wirth, V., Düll, R., & Caspari, S. (2018). *Flechten und Moose* (2. Aufl.). Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Zechmeister, H. G. (2014). Moose in den Wäldern des Biosphärenparks Wienerwald- eine Basiserhebung. *Wiss. Mitt. Nideroesterr. Landesmuseum*, 25, S. 209-236.
- Zechmeister, H. G., & Moser, D. (2001). The influence of agricultural land-use intensity on bryophyte species richness. *Biodiversity and Conservation*, 10, S. 1609–1625.
- Zeileis, A. (2022). *lmtest: Testing Linear Regression Models* (R package version 0.9-40). <https://www.rdocumentation.org/packages/lmtest/versions/0.9-40> [Zugriff: 06.08.2024]

Anhang

Anhang A Datenerhebung und -aufbereitung im GIS

A1 Vorgehen zur Aufbereitung der Untersuchungspunkte

Um die Untersuchungspunkte zu ermitteln, wurde im GIS zuerst der vom lawa erhaltene GIS-Datensatz (lawa, 2024a) mit der vom lawa erhaltenen Excel-Tabelle (lawa, 2024c) zusammengeführt (Abbildung 33). Anschliessend wurden EW und WiW in den BZ2 und BZ3 herausgefiltert. Um den Randeffect zu berücksichtigen, wurde ein Puffer von -5 m um alle Flächen erstellt. Flächen, die kleiner als 10 a waren, wurden herausgefiltert, da diese zu klein wären, um eine ausgewogene Untersuchung an vier Punkten in der Fläche durchzuführen. In jeder Fläche wurden vier zufällige Punkte generiert, die einen Mindestabstand von 0.5 m² zueinander haben. Die Feature Class wurde mit der vom lawa erhaltenen Excel-Tabelle Naturschutzverträge (lawa, 2024d) zusammengeführt. Ein zusätzliches Attribut wurde ergänzt, um zu notieren, welche Flächen der UBE als vermoost gemeldet wurden. Nun konnten die zu untersuchenden Flächen selektiert und in einen 3D-Datensatz umgewandelt werden. Der fertige Datensatz "BFF_4Pt_Untersuchungsflächen" wurde in einer Feature Class abgespeichert und für weitere Datenanalysen ins Excel exportiert.

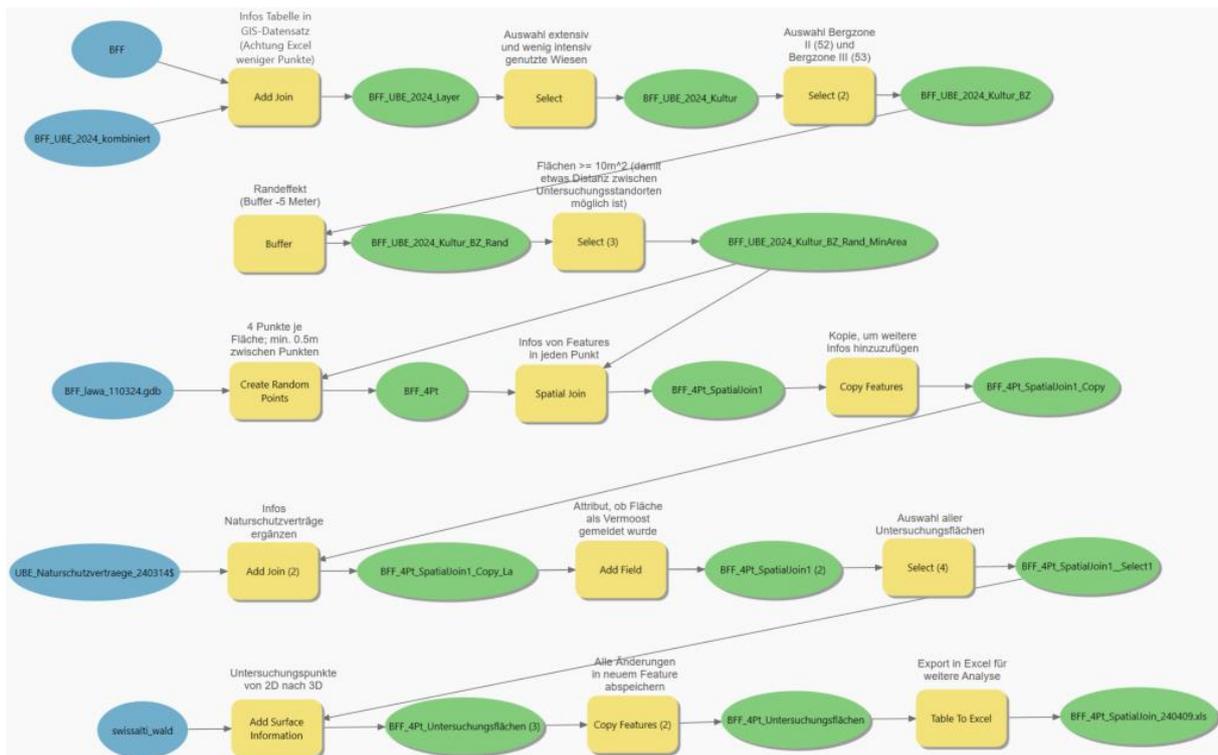


Abbildung 33: Zusammenfügen aller Informationstabellen und Datensätze sowie Selektion der Untersuchungsflächen und -punkte im "ModelBuilder".

Nachdem alle Variablen im GIS zusammengefügt wurden, konnte der Datensatz weiter für die Feldarbeit vorbereitet werden (Abbildung 34). Die Informationen zum Naturschutz mussten aus technischen Gründen nochmals dem Datensatz angefügt werden (lawa, 2024d). Danach wurde die Attributliste mit den im Feld zu erhebenden Attributen – Punkt_ID, Moosquadrante, Moosfrequenz, Bodenfrequenz, Pflanzenfrequenz, Zeigerpflanzen 1 bis 10, Geländemorphologie, Vegetationshöhe, Erhebungsdatum und Bemerkung – ergänzt und nicht benötigte Attribute gelöscht. Die Punkt_ID wurde aus der BPO_ID und der

OBJECTID berechnet, um jedem Untersuchungspunkt eine eindeutige Identifikation zu geben. Für die Geländemorphologie und Zeigerpflanzen 1 bis 10 wurden je eine Domain erstellt. Der Datensatz für die Feldarbeit wurde unter "Untersuchungspunkte_Feldarbeit" abgespeichert.

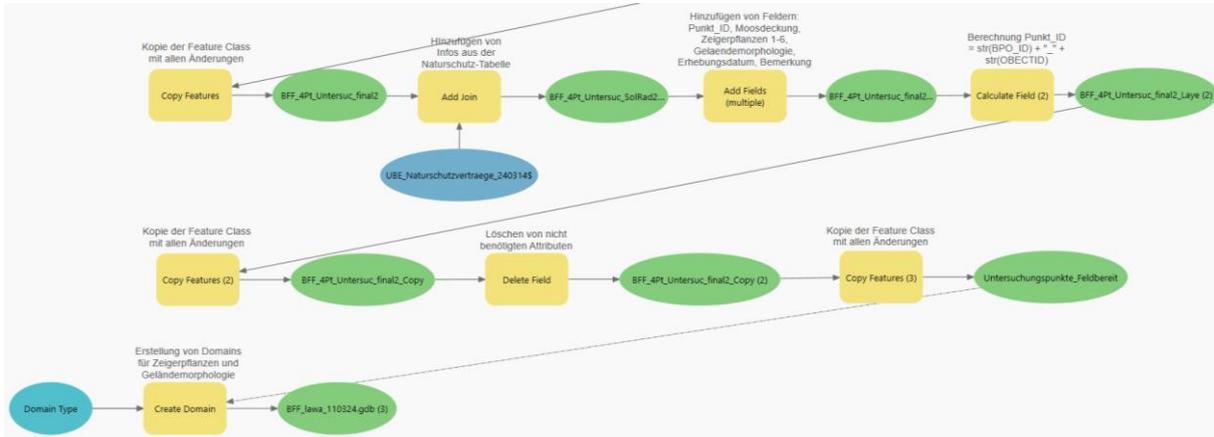


Abbildung 34: Vorgehen zur Überarbeitung der Attributtabelle und dem hinzufügen und löschen von Attributen sowie die Erstellung von Domains im "ModelBuilder".

A2 Vorgehen Variable Exposition und Hangneigung

Es wurde darauf verzichtet, die Exposition und Hangneigung im Feld zu messen, da diese mittels GIS mit wenig Aufwand und hoher Genauigkeit ermittelt werden können. Die Berechnungen mittels GIS wurden jedoch im Feld punktuell überprüft. Zur Berechnung wurde der Rasterdatensatz "swissALTI3D" (swisstopo, 2023) für die Region Entlebuch heruntergeladen. Anschliessend wurden im GIS die Exposition und Hangneigung mit Hilfe der Tools "Aspect" und "Slope" berechnet (Abbildung 35). Die Exposition wurde weiter in die jeweiligen Himmelsrichtungen klassifiziert, wobei Norden von 315.1° bis 45.0°, Osten von 45.1° bis 135.0°, Süden von 135.1° bis 225.0° und Westen von 225.1° bis 315.0° definiert wurde. Die berechneten Attribute wurden in den Datensatz "BFF_4Pt_Untersuchungsflächen" eingefügt.

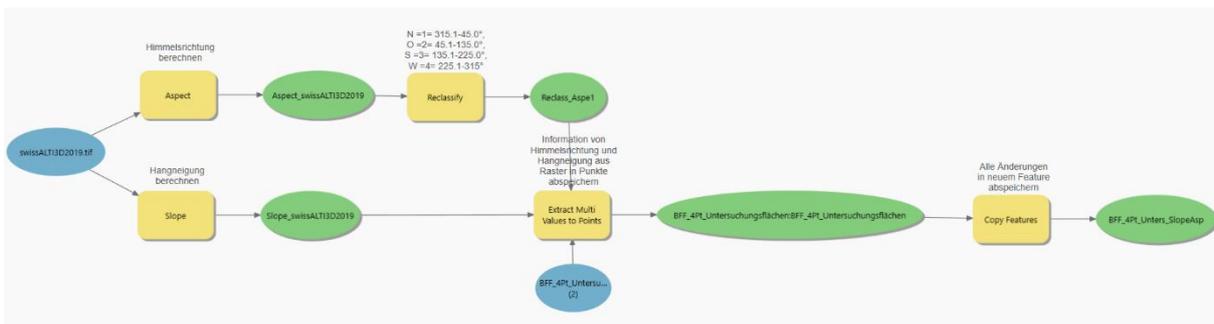


Abbildung 35: Vorgehen zur Berechnung der Variablen Exposition und Hangneigung im "ModelBuilder".

A3 Vorgehen Variable Radiation

Da eine Erhebung der Beschattung mittels Sonnenkompass oder Kamera im Feld ungenau und zeitintensiv wäre, wurde die Beschattung mittels globaler Strahlung im GIS berechnet (Abbildung 36). Da in der Region Entlebuch kein DOM vorhanden ist, wurde ein stark vereinfachtes DOM selbst erstellt. Dafür wurde die "Arealstatistik Bodenbedeckung" heruntergeladen und nach Baumvegetationen selektioniert (BFS, 2018). Diesen wurde ein Attribut "Baumhoehe" mit dem Wert 40 m hinzugefügt. Die 40 m beruhen auf einer starken Vereinfachung aufgrund der Annahme, dass im Entlebuch Buchen und Fichten die dominierenden Baumarten sind, wobei Buchen eine Baumhöhe bis zu 40 m und Fichten eine Baumhöhe

von 35 bis 50 m erreichen können (Häne, 2017; InfoFlora, 2018c; Schüpbach, 2002). Parallel dazu wurde eine Feature Class mit einem Polygon der Region Entlebuch erstellt. Die Bodenbedeckung wurde auf die Region Entlebuch zugeschnitten und aufgeteilt in Bodenbedeckung ohne Bäume und Bodenbedeckung mit Bäumen. Diese Feature Class wurde dann basierend auf "swissALTI3D" zu einem Rasterdatensatz umgewandelt. Die Bodenbedeckung mit 40 m Waldvegetation konnte dann auf das DHM "swissALTI3D" hinzugefügt werden, um so eine Erhöhung bei Wald o. ä. zu erhalten. Das daraus erstellte, stark vereinfachte DOM wurde dann verwendet, um die globale Strahlung jedes Untersuchungspunkts zu berechnen. Die globale Strahlung wurde an jedem Punkt für den längsten Tag des Jahres – den 21. Juni 2024 – berechnet, um so die maximale Strahlung in Wattstunden pro Quadratmeter (Wh/m^2) zu bestimmen. Eine Berechnung der Strahlung über die gesamte Vegetationszeit oder das gesamte Jahr wurde aufgrund der Rechnerleistung nicht durchgeführt. Der erhaltene Datensatz "BFF_4Pt_Untersuc_SolRad2" wurde anschliessend für die weitere Aufbereitung der Daten, welche für die Feldarbeit benötigt werden, verwendet.

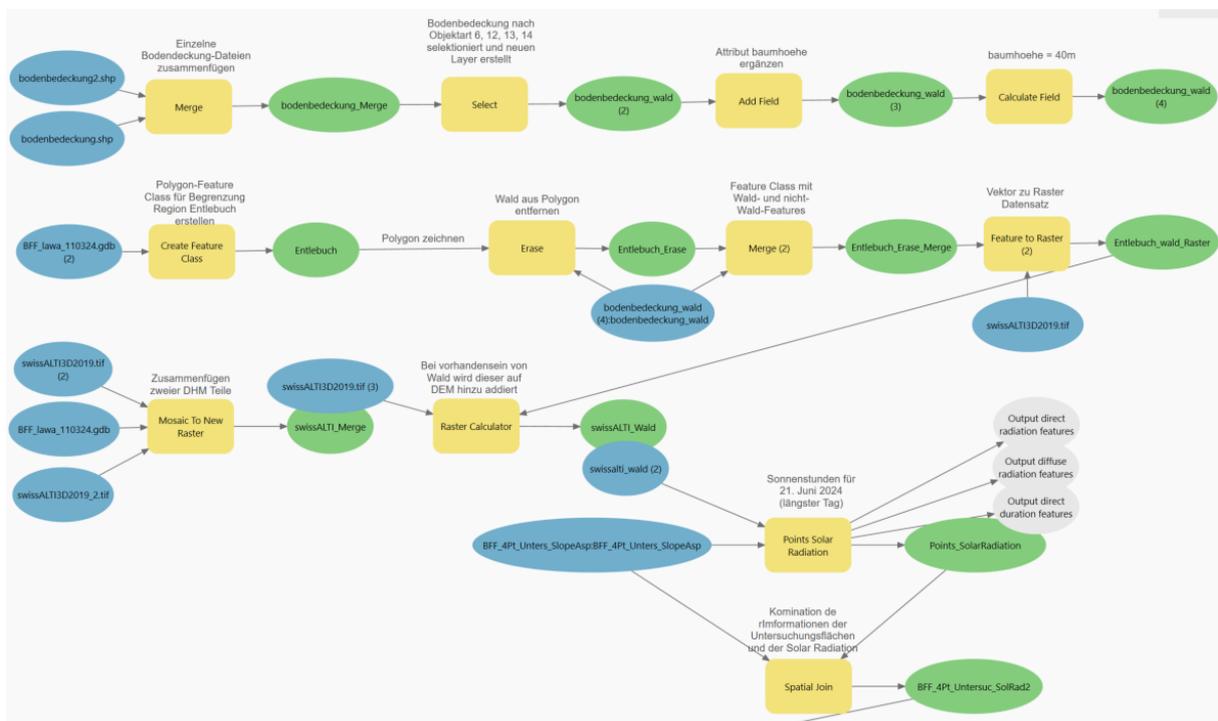


Abbildung 36: Vorgehen im "ModelBuilder" zur Erstellung eines stark vereinfachten DOM für die Berechnung der globalen Strahlung je Untersuchungspunkt am 21. Juni 2024.

A4 Vorgehen Variable NDVI

Eine Vermessung einer Fläche kann negative Auswirkungen auf die Vegetationsdichte und den Ertrag haben (Machatschek, 2017). Das Messen der gewachsenen Biomasse, wie es beispielsweise in Boch et al. (2018) durchgeführt wurde, war nicht möglich. Mit einem Rising Plate Meter könnte der Ertrag vor Ort je Untersuchungspunkt gemessen werden (Werner et al., 2024), jedoch sind diese Instrumente auf eine homogene Raygras-Vegetation ausgelegt und daher nicht für heterogene, biodiverse Extensivwiesen geeignet. Eine Berechnung der Trockensubstanz mittels Rising Plate Meter wäre demnach ungenau. Aufgrund der Rastergrösse von etwa 40 m können mittels NDVI nur grob auf die Vegetationsdichte auf grösseren Flächen geschätzt werden (Giuliana, 2019). Die grosse Pixelgrösse führt jedoch dazu, dass auch Waldanteile in die Graslandfläche einbezogen werden können. Der NDVI-Rasterdatensatz wurde den Untersuchungspunkten nachträglich hinzugefügt (Abbildung 37).

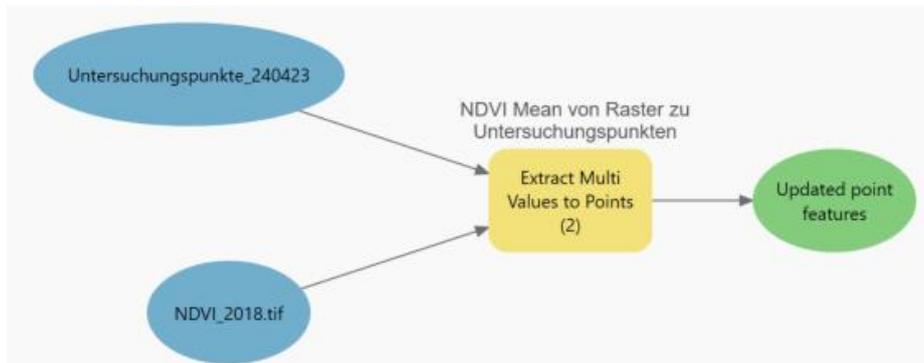


Abbildung 37: Vorgehen im "ModelBuilder" zur nachträglichen Einbindung des NDVI-Layers in den Punktdatensatz der Untersuchungspunkte.

A5 Vorgehen Variable Geländemorphologie

Die Geländemorphologie wurde dem Datensatz "Untersuchungspunkte_Feldarbeit", wie in Abbildung 34 ersichtlich, hinzugefügt. Zusätzlich wurde eine Domain mit den in Tabelle 11 dargestellten Werten erstellt. Die Kategorie "felsig/steinig" wurde nicht verwendet und daher nachträglich aus den Analysen ausgeschlossen.

Tabelle 11: Code und Bezeichnung der Domäne Geländemorphologie.

Code	Bezeichnung
1	Oberer Hangbereich
2	Mittlerer Hangbereich
3	Unterer Hangbereich
4	Mulde
5	Kuppe
6	Felsig/steinig
7	Flach

A6 Vorgehen Variable Zeigerpflanze

Um die Auswertung der Daten zu vereinfachen, wurden zehn einzelne Attribute für die Zeigerpflanzen erstellt, sodass die jeweils vorkommenden Pflanzen je Untersuchungsquadrat einzeln abgespeichert werden können. Diese Attribute wurden dem Datensatz "Untersuchungspunkte_Feldarbeit", wie in Abbildung 34 ersichtlich, hinzugefügt. Zusätzlich wurde eine Domain für diese Attribute erstellt, die die in Tabelle 12 dargestellten Werte enthält. Dabei wurde die Liste der Zeigerpflanzen für die Alpennordseite mit mittlerem biologischem Potential (Liste C) nach Benz et al. (2018) verwendet. Das biologische Potential wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht bestimmt. Daher wurde für eine einheitliche Datengrundlage dieselbe Liste für jeden Untersuchungspunkt verwendet. Die Liste C enthält eine grössere Anzahl von Zeigerpflanzen und ist detaillierter.

Tabelle 12: Code und Bezeichnung der Domaine Zeigerpflanzen.

Code	Bezeichnung
1	Alpenhelm
2	Arnika
3	Aufrechte Trespe
4	Betonie
5	Blutwurz, Aufrechtes Fingerkraut
6	Dost, Wirbeldost
7	Enziane blau/violett
8	Espарsette
9	Flaumhafer
10	Flockenblumen
11	Gelbe Primeln
12	Glockenblumen
13	Gräser, borstblättrig, horstwüchsig
14	Habermark, Wiesen-Bocksbart
15	Hainsimsen
16	Herbstzeitlose
17	Hopfenklee
18	Klappertopf
19	Klee, gelb, grossköpfig
20	Knolliger Hahnenfuss
21	Kohldistel
22	Korbblütler, gelb, einköpfig
23	Korbblütler, gelb, mehrköpfig
24	Mädesüss, Spierstaude
25	Leimkräuter weiss
26	Kuckucks-Lichtnelke
27	Margerite
28	Mehlprimel
29	Mittlerer Wegerich
30	Orchideen
31	Platterbsen gelb
32	Ruchgras
33	Schlaffe Segge
34	Seggen
35	Skabiose/Witwenblumen
36	Sterndolde
37	Sumpfdotterblume

38	Sumpferzblatt
39	Teufelskrallen, Rapunzeln
40	Thymian
41	Trollblume
42	Vogel-Wicke
43	Wiesenknopf
44	Wiesensalbei
45	Wollgräser
46	Zittergras
47	Zypressenblättrige Wolfsmilch

Anhang B Deskriptive Statistik Moosquadrate

B1 Definitionsvariablen

In Abbildung 38 ist der Zusammenhang zwischen der erklärenden Variable Moosquadrate und der Definitionsvariable Erhebungsreihenfolge dargestellt. Die Erkenntnisse entsprechen den im Kapitel 3.2.3 beschriebenen Beobachtungen.

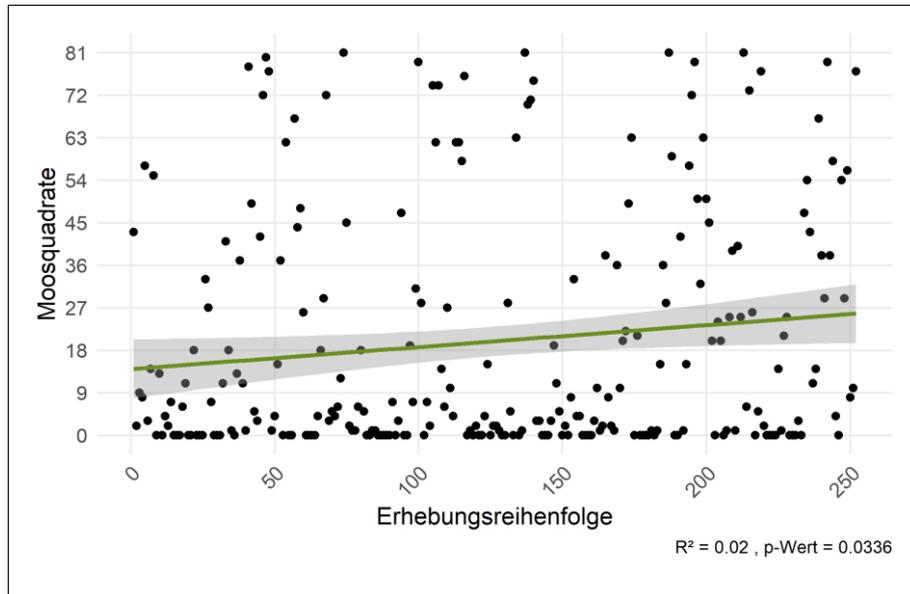


Abbildung 38: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrate mit der Erhebungsreihenfolge (95%-Konfidenzintervall in grau).

B2 Bewirtschaftungsvariablen

Weiterhin wurden verschiedene Bewirtschaftungsvariablen in Beziehung zu den erklärenden Variablen Moosquadrate und Moosfrequenz analysiert. Diese Beobachtungen wurden bereits im Kapitel 3.3 erläutert und anhand der Abbildungen zur Moosfrequenz dargestellt. In den folgenden Abbildung 39 bis 43 sind zusätzliche Grafiken zur Variable Moosquadrate aufgeführt.

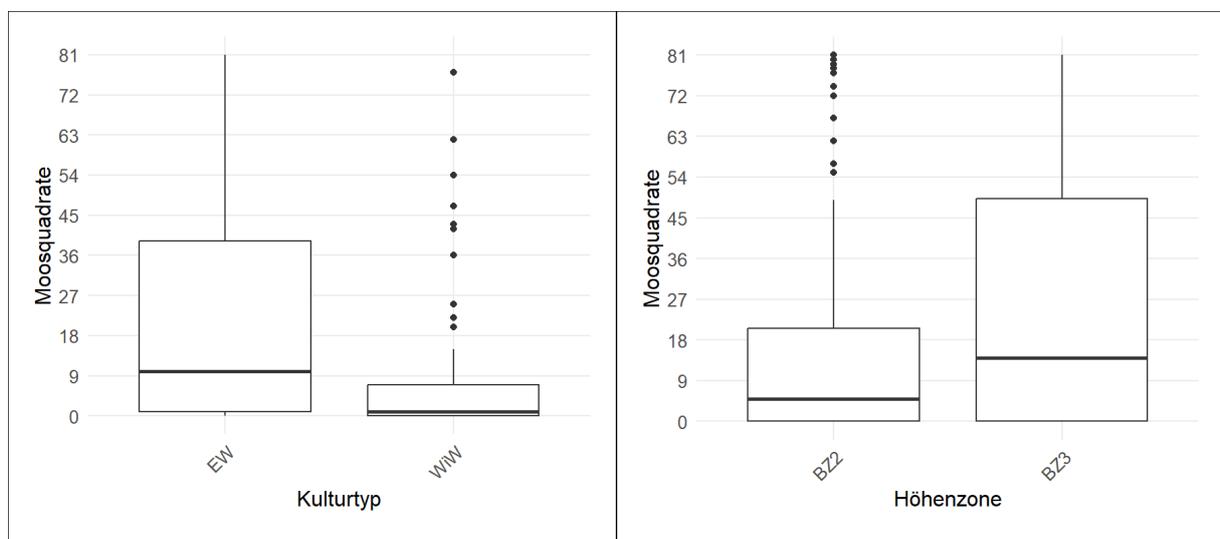


Abbildung 39: Links: Vergleich der Moosquadrate auf extensiv und wenig intensiv genutzten Wiesen mit Median, Interquartilabstand und Whiskers. Rechts: Vergleich der Moosquadrate je Höhenzone resp. Schnittzeitpunkt mit Median, Interquartilabstand und Whiskers.

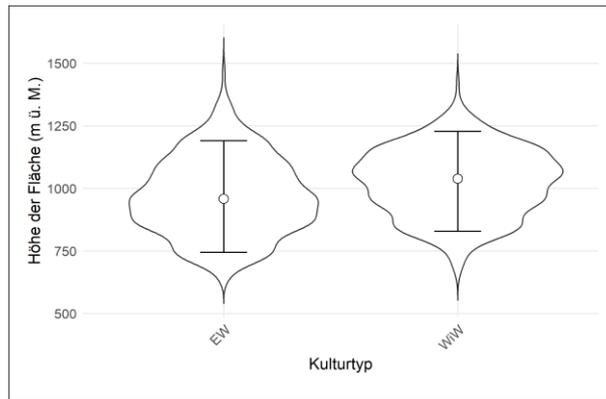


Abbildung 40: Vergleich der Höhe über Meer von allen EW und WiW in der UBE mit Median und Interquartilabstand.

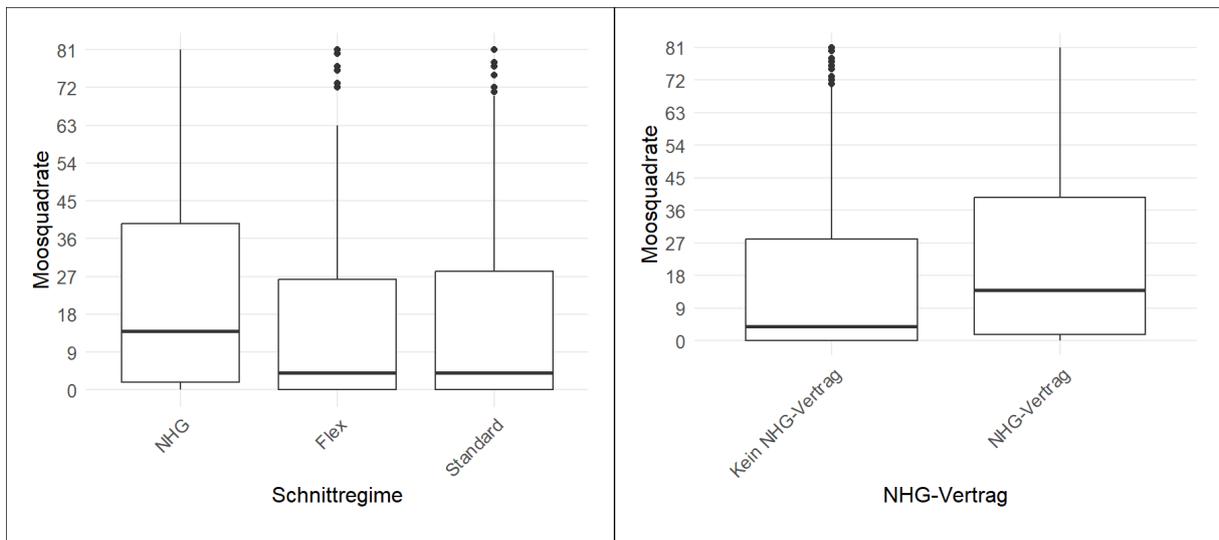


Abbildung 41: Links: Vergleich der Moosquadrate je untersuchtes Schnittregime mit Median, Interquartilabstand und Whiskers. Rechts: Vergleich der Moosquadrate je NHG-Ebene mit Median, Interquartilabstand und Whiskers.

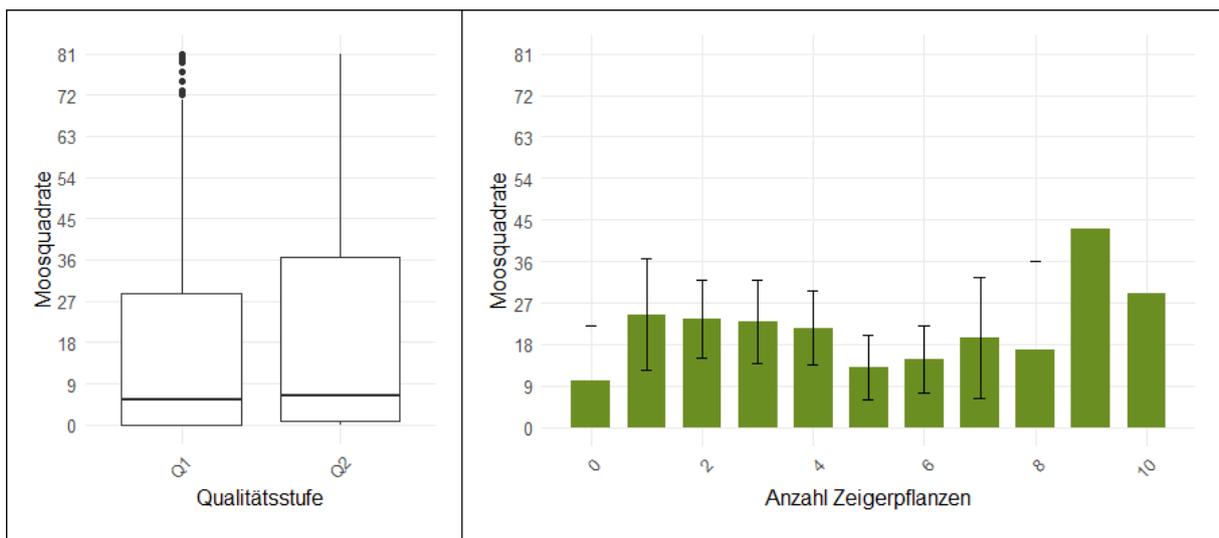


Abbildung 42: Links: Vergleich der Moosquadrate je Qualitätsstufe mit Median, Interquartilabstand und Whiskers. Rechts: Durchschnittliche Moosquadrate je nach Anzahl Zeigerpflanzen mit Konfidenzintervall (schwarz) bei mehreren Datenpunkten.

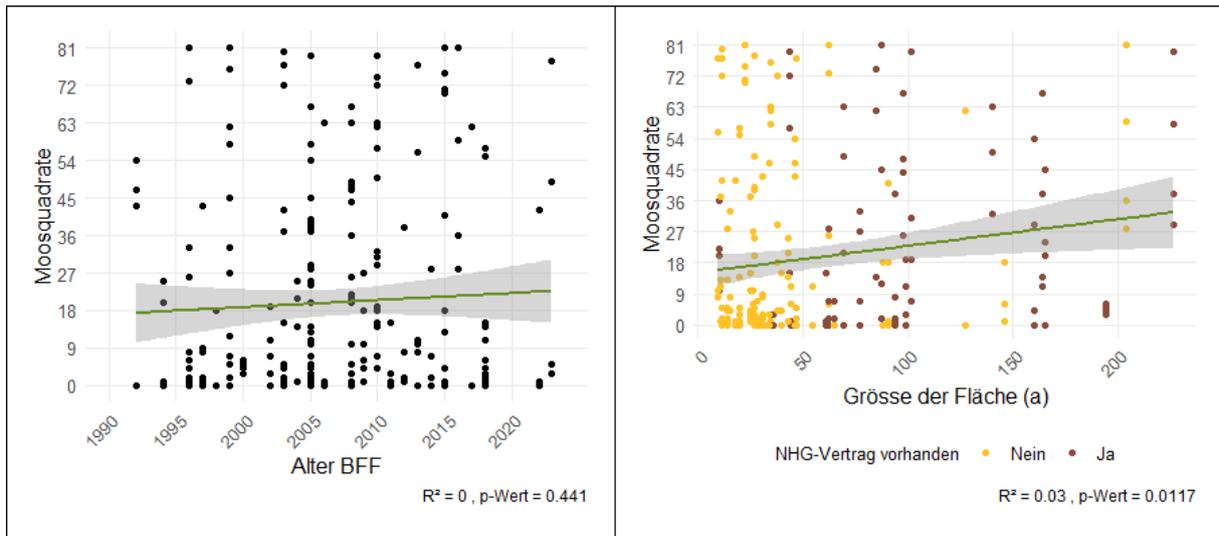


Abbildung 43: Links: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrates mit dem Alter der BFF (95%-Konfidenzintervall in grau). Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrates mit der Flächengrösse in Aren (95%-Konfidenzintervall in grau), wobei die Punkte farblich nach NHGF (braun) und nicht NHGF (gelb) gruppiert sind.

B3 Umweltvariablen

Des Weiteren wurden verschiedene Umweltvariablen in Beziehung zu den erklärenden Variablen Moosfrequenz und Moosquadrates analysiert. Die Beobachtungen und Abbildungen der Umweltvariablen im Zusammenhang mit der Moosfrequenz sind in Kapitel 3.4 aufgeführt. In den folgenden Abbildung 44 bis 49 sind zusätzliche Grafiken der Umweltvariablen im Zusammenhang mit den Moosquadrates dargestellt.

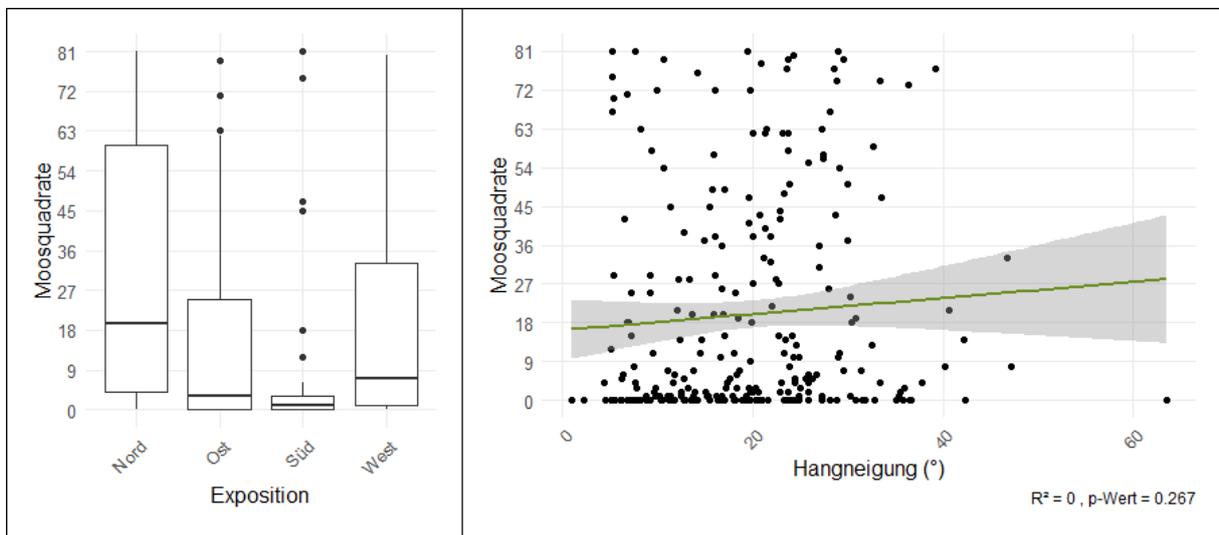


Abbildung 44: Links: Vergleich der Moosquadrates je nach Exposition mit Median, Interquartilabstand und Whiskers. Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrates mit der Hangneigung (95%-Konfidenzintervall in grau).

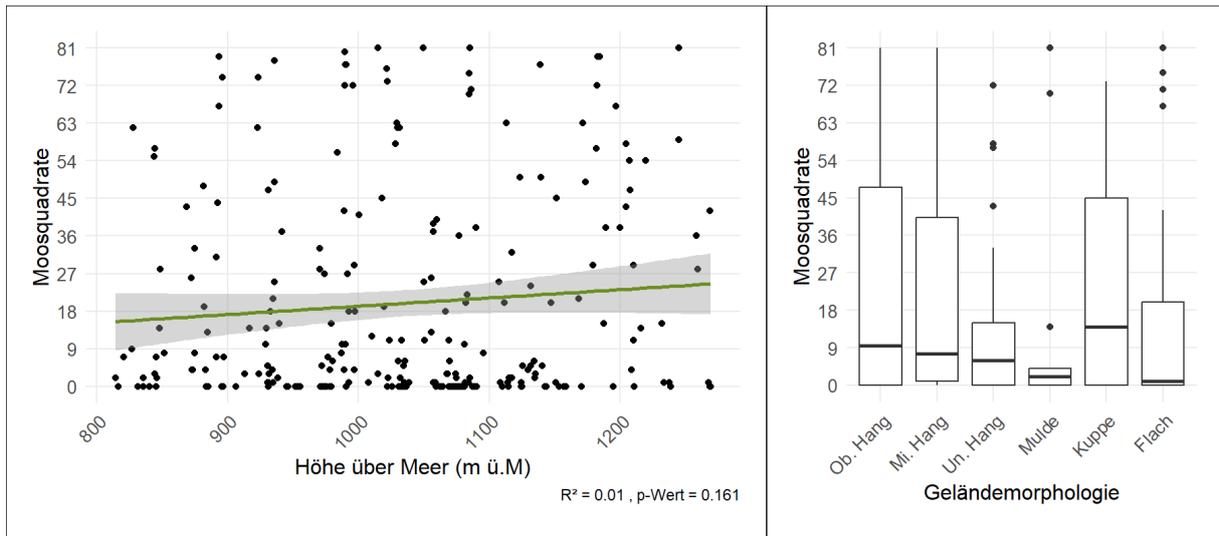


Abbildung 45: Links: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrate mit der Höhe über Meer (95%-Konfidenzintervall in grau). Rechts: Vergleich der Moosquadrate mit den unterschiedlichen Geländemorphologie-Kategorien mit Median, Interquartilabstand und Whiskers.

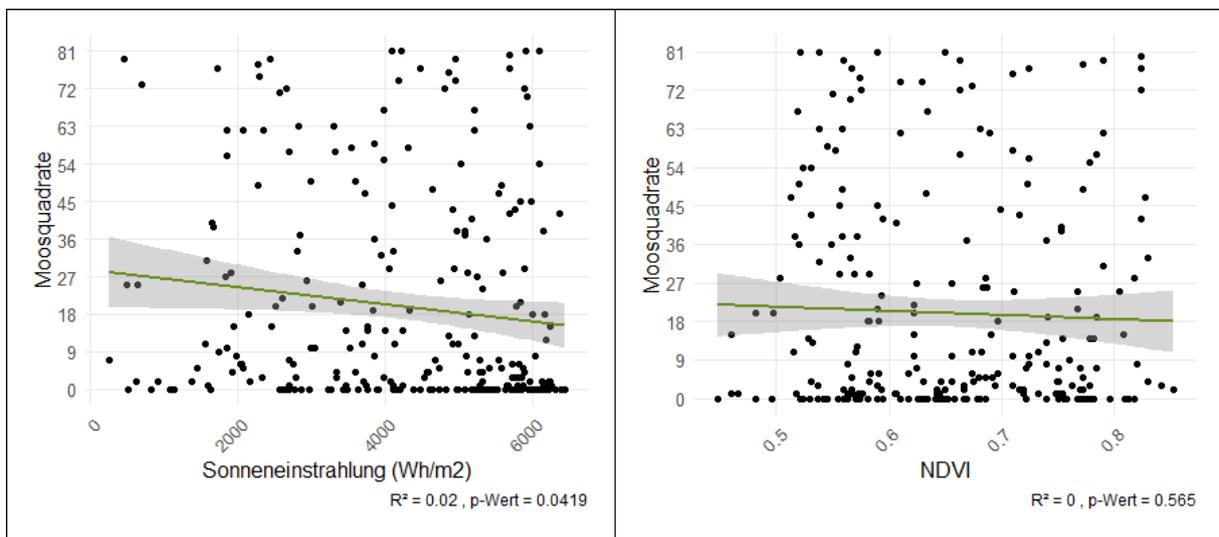


Abbildung 46: Links: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrate mit der Sonneneinstrahlung in Wh/m² (95%-Konfidenzintervall in grau). Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrate mit dem NDVI aus dem Jahr 2018 (95%-Konfidenzintervall in grau).

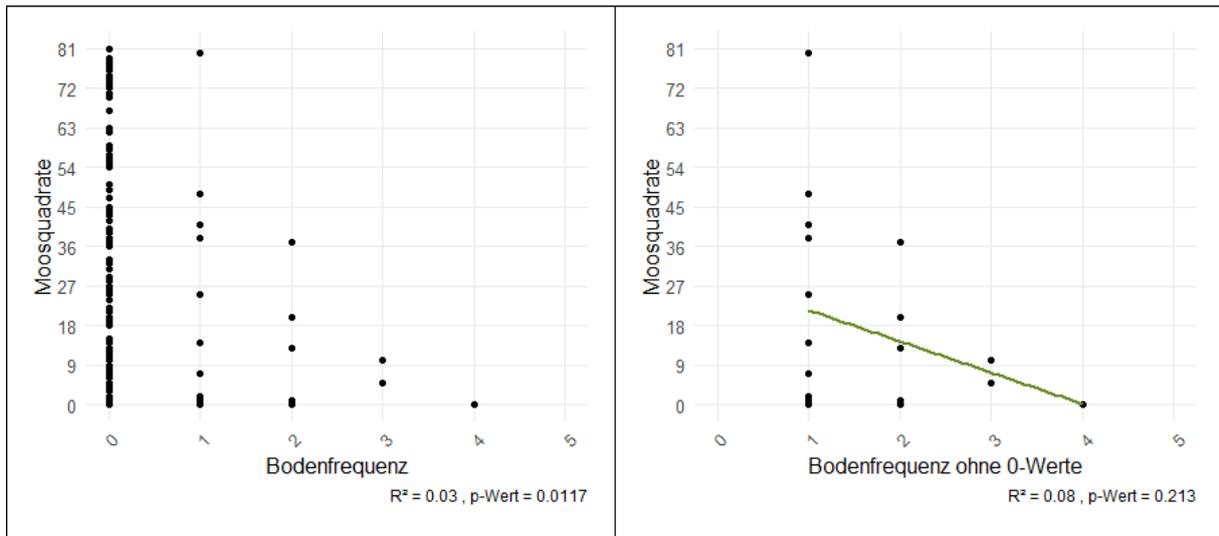


Abbildung 47: Links: Vergleich der Moosquadrate mit der Bodenfrequenz. Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrate mit der Bodenfrequenz ohne der Untersuchungspunkte mit einer Bodenfrequenz von null.

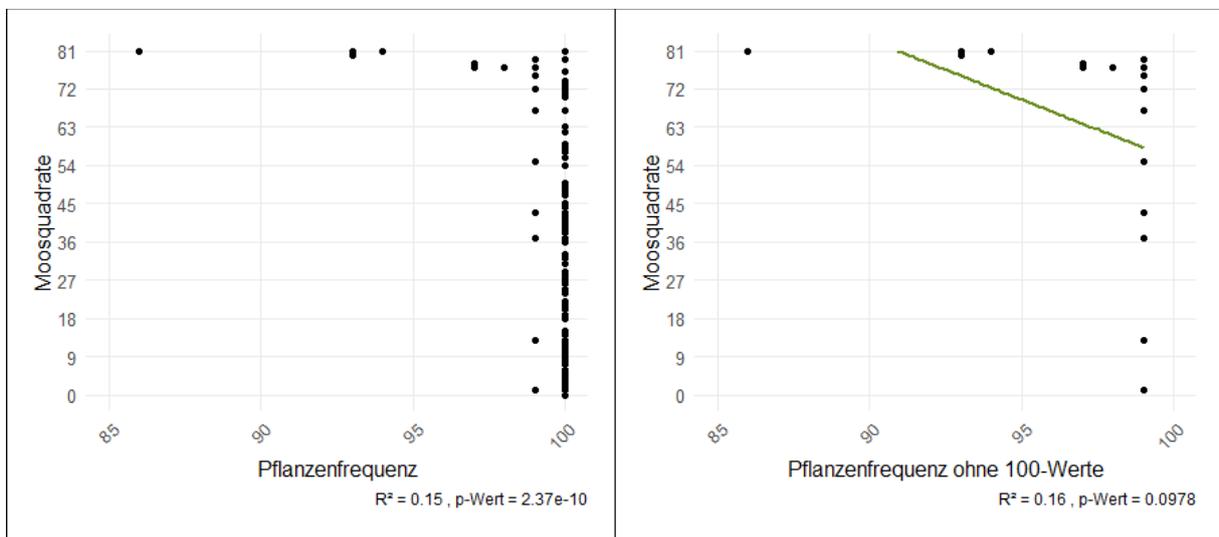


Abbildung 48: Links: Vergleich der Moosquadrate mit der Pflanzenfrequenz. Rechts: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrate mit der Pflanzenfrequenz ohne der Untersuchungspunkte mit einer Pflanzenfrequenz von 100.

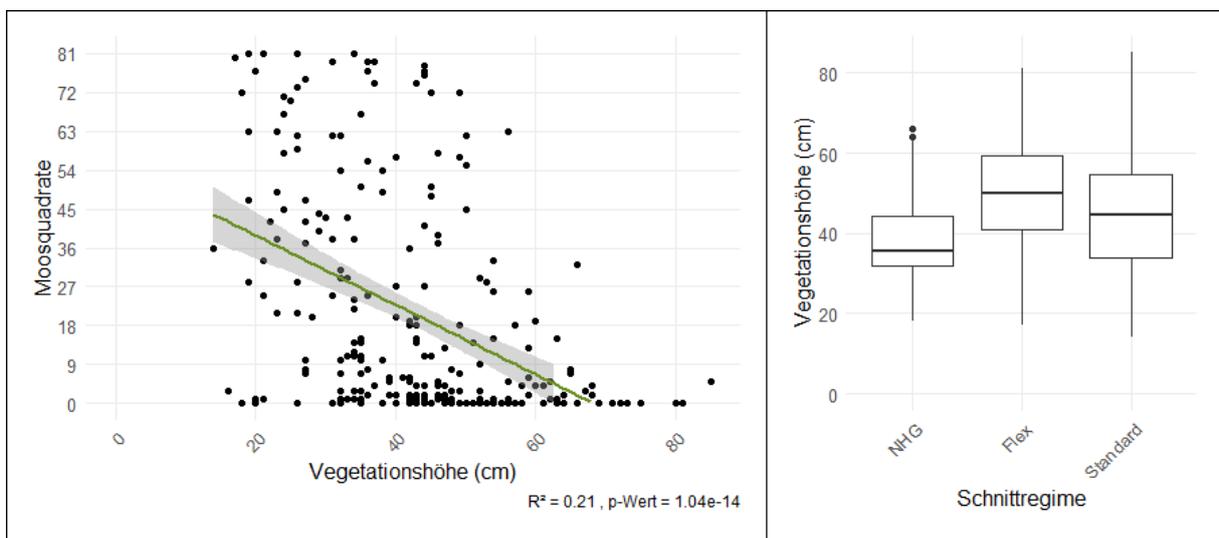


Abbildung 49: Links: Vergleich und linearer Trend (grün) der Moosquadrate mit der Vegetationshöhe in cm (95%-Konfidenzintervall in grau). Rechts: Vergleich der Vegetationshöhe in cm je Schnittregime mit Median, Interquartilabstand und Whiskers.

Anhang C Modelle

C1 Vorhersagegenauigkeit der Modelle

In den folgenden Abbildung 50 bis 52 werden die von den Modellen vorhergesagten Werte mit den im Feld beobachteten Werten verglichen. Die braune Diagonale stellt die ideale Übereinstimmung der vorhergesagten und beobachteten Werte dar. In allen Abbildungen ist eine Konzentration entlang der Diagonale zu erkennen. Die Daten zeigen eine leichte geringere Neigung als die ideale Diagonale, was darauf hindeutet, dass die von den Modellen vorhergesagten Werte, die tendenziell eine niedrige Vermoosung anzeigten, höher geschätzt wurden als im Feld beobachtet, während die hohen Werte, die von den Modellen vorhergesagt wurden, geringer ausfielen als im Feld beobachtet.

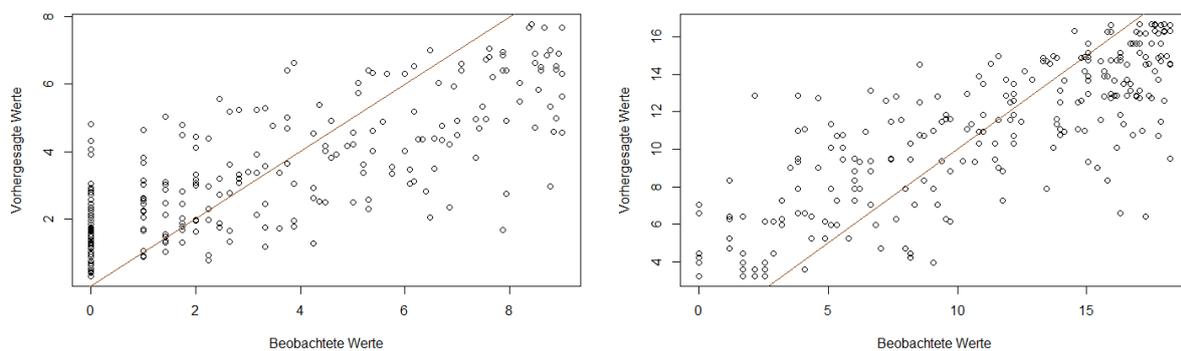


Abbildung 50: Vergleich der im Bewirtschaftungsmodell vorhergesagten und im Feld beobachteten Werte der Variable Moosquadrate (links) und Moosfrequenz (rechts).

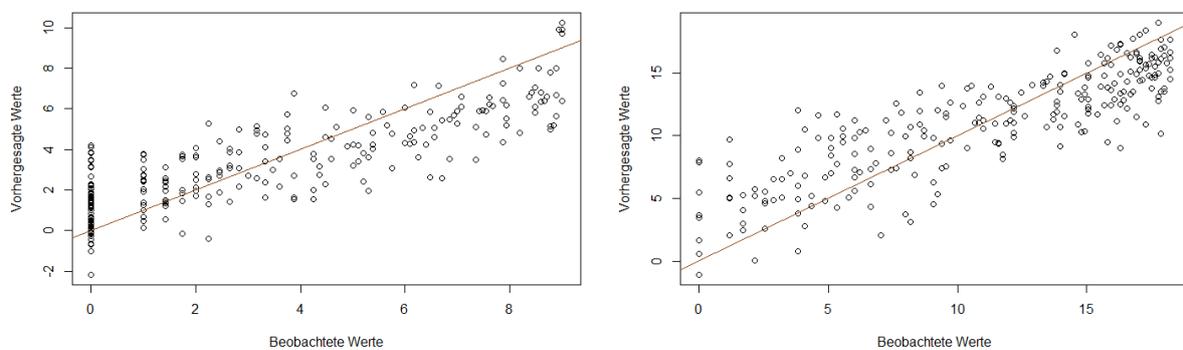


Abbildung 51: Vergleich der im Umweltmodell vorhergesagten und im Feld beobachteten Werte der Variable Moosquadrate (links) und Moosfrequenz (rechts).

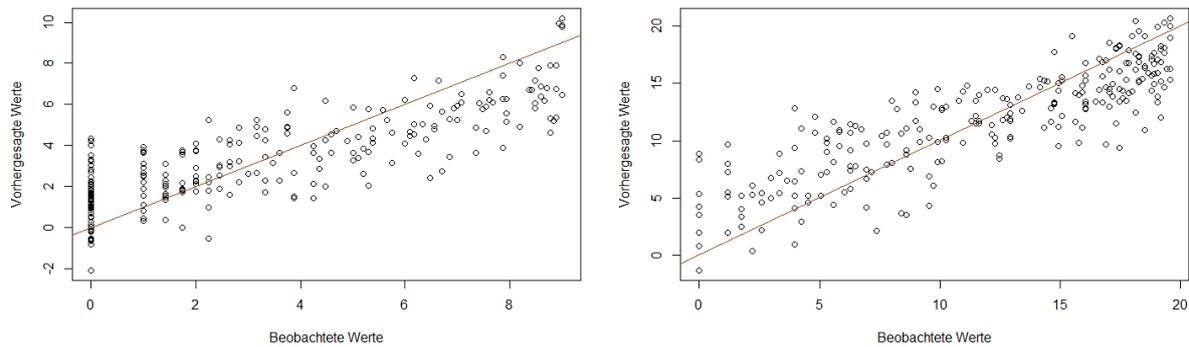


Abbildung 52: Vergleich der im Gesamtmodell vorhergesagten und im Feld beobachteten Werte der Variable Moosquadratrate (links) und Moosfrequenz (rechts).

C2 Gesamtmodell mit allen Variablen

Zur Analyse der transformierten erklärenden Variable Moosquadratrate wurde in einem ungefilterten Modell die Wirkung der folgenden Variablen untersucht: Kulturtyp, Höhenzone, Schnittregime, Alter BFF, Qualitätsstufe, Geländemorphologie, Vegetationshöhe, Pflanzenfrequenz, Bodenfrequenz, Anzahl Zeigerpflanzen, Exposition, Hangneigung, Sonneneinstrahlung, Höhe über Meer, Fläche BFF, Erhebungsreihenfolge und Gemeldet (Tabelle 13). Zudem wurde der Random-Effekt Flächen-ID berücksichtigt. Das REML lag bei 511.0. Die Modellgüte zeigte ein marginales R^2 von 0.459 und ein konditionales R^2 von 0.639. Dies bedeutet, dass 45.9% der Varianz durch feste Effekte und 63.9% der Varianz durch feste und zufällige Effekte erklärt wurden. Die Varianzkomponente der Flächen-ID betrug 1.86 und deutete auf leicht signifikante Unterschiede zwischen den Flächen hin.

Tabelle 13: Output des ungefilterten Gesamtmodells mit allen Variablen und der erklärenden Variable Moosquadratrate, wobei ein t-Wert von ± 1.96 als signifikant ($* < 0.05$), $+2.58$ als hoch signifikant ($** < 0.01$) und ± 3.29 als extrem signifikant ($*** < 0.001$) gilt.

Feste Effekte	Estimate	Standardabweichung	t-Wert
Intercept	51.120	16.145	3.17 **
Kulturtyp – WiW	0.298	1.381	0.22
Höhenzone – BZ3	0.551	1.784	0.31
Schnitt/NHG – Flex	2.047	1.240	1.65
Schnitt/NHG – Standard	0.021	1.084	0.02
Alter BFF	0.780	0.678	1.15
Qualitätsstufe – Q2	0.411	0.846	0.49
Geländemorphologie – Mi. Hang	0.436	0.753	0.58
Geländemorphologie – Un. Hang	-0.718	0.865	-0.83
Geländemorphologie – Mulde	-2.504	1.136	-2.20 *
Geländemorphologie – Kuppe	0.020	1.110	0.02
Geländemorphologie – Flach	-0.891	0.983	-0.91
Vegetationshöhe	-1.109	0.278	-3.99 ***
Pflanzenfrequenz	-0.480	0.161	-2.99 **
Bodenfrequenz	0.298	0.377	0.79
Anzahl Zeigerpflanzen	0.156	0.264	0.59

Exposition – Ost	-1.283	0.685	-1.87
Exposition – Süd	-1.782	0.896	-1.99 *
Exposition – West	-0.840	0.643	-1.31
Hangneigung	-0.127	0.252	-0.50
Sonneneinstrahlung	-0.308	0.301	-1.02
Höhe über Meer	-0.248	0.648	-0.38
Fläche BFF	0.238	0.496	0.48
Erhebungsreihenfolge	0.293	0.825	0.36
Gemeldet – Gemeldet	1.630	0.971	1.68

Zur Analyse der transformierten erklärenden Variable Moosfrequenz wurden die Variablen Kulturtyp, Höhenzone, Schnittregime, Alter BFF, Qualitätsstufe, Geländemorphologie, Vegetationshöhe, Pflanzenfrequenz, Bodenfrequenz, Anzahl Zeigerpflanzen, Exposition, Hangneigung, Sonneneinstrahlung, Höhe über Meer, Fläche BFF, Erhebungsreihenfolge und Gemeldet sowie der Random-Effekt Flächen-ID berücksichtigt (Tabelle 14). Das REML lag bei 1396.6. Die Modellgüte zeigte ein marginales R^2 von 0.433 und ein konditionales R^2 von 0.655. Dies bedeutet, dass 43.3% der Varianz durch feste Effekte und 65.5% der Varianz durch feste und zufällige Effekte erklärt wurden. Die Varianzkomponente der Flächen-ID betrug 8.58 und deutete auf signifikante Unterschiede zwischen den Flächen hin.

Tabelle 14: Output des ungefilterten Gesamtmodells mit allen Variablen und der erklärenden Variable Moosfrequenz, wobei ein t-Wert von ± 1.96 als signifikant ($ < 0.05$), $+2.58$ als hoch signifikant ($** < 0.01$) und ± 3.29 als extrem signifikant ($*** < 0.001$) gilt.*

Feste Effekte	Estimate	Standardabweichung	t-Wert
Intercept	67.405	22.820	2.95 **
Kulturtyp – WiW	-0.987	1.403	-0.70
Höhenzone – BZ3	0.180	1.621	0.11
Schnitt/NHG – Flex	-0.042	1.631	-0.03
Schnitt/NHG – Standard	-0.533	1.304	-0.41
Alter BFF	0.056	0.483	0.12
Qualitätsstufe – Q2	-1.129	1.138	-0.99
Geländemorphologie – Mi. Hang	0.510	0.965	0.53
Geländemorphologie – Un. Hang	1.482	1.193	1.24
Geländemorphologie – Mulde	-4.499	1.505	-2.99 **
Geländemorphologie – Kuppe	1.208	1.539	0.79
Geländemorphologie – Flach	0.356	1.335	0.27
Vegetationshöhe	-1.952	0.376	-5.19 ***
Pflanzenfrequenz	-0.542	0.228	-2.38 *
Bodenfrequenz	-0.117	0.286	-0.41
Anzahl Zeigerpflanzen	0.064	0.366	0.18
Exposition – Ost	-2.979	0.946	-3.15 **
Exposition – Süd	-5.330	1.150	-4.64 ***
Exposition – West	-2.046	0.810	-2.53 *

Hangneigung	0.012	0.367	0.03
Sonneneinstrahlung	-0.415	0.388	-1.07
Höhe über Meer	-0.252	0.744	-0.34
Fläche BFF	-0.069	0.563	-0.12
Erhebungsreihenfolge	1.062	0.852	1.25
Gemeldet – Gemeldet	3.035	1.042	2.91 **

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten schriftlichen Arbeit. Eine der folgenden drei Optionen ist in Absprache mit der verantwortlichen Betreuungsperson verbindlich auszuwählen:

- Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben, namentlich, dass mir niemand beim Verfassen der Arbeit geholfen hat. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuungsperson. Es wurden keine Technologien der generativen künstlichen Intelligenz¹ verwendet.
- Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben, namentlich, dass mir niemand beim Verfassen der Arbeit geholfen hat. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuungsperson. Als Hilfsmittel wurden Technologien der generativen künstlichen Intelligenz² verwendet und gekennzeichnet.
- Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben, namentlich, dass mir niemand beim Verfassen der Arbeit geholfen hat. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuungsperson. Als Hilfsmittel wurden Technologien der generativen künstlichen Intelligenz³ verwendet. Der Einsatz wurde, in Absprache mit der Betreuungsperson, nicht gekennzeichnet.

Titel der Arbeit:

Analyse der Vermoosung auf Biodiversitätsförderflächen und Naturschutzflächen in der UNESCO Biosphäre Entlebuch

Verfasst von:

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Reinert

Vorname(n):

Nadine

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe mich an die Regeln des «Zitierleitfadens» gehalten.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu und vollständig dokumentiert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die Arbeit mit elektronischen Hilfsmitteln auf Eigenständigkeit überprüft werden kann.

Ort, Datum

Rothenburg, 14.10.2024

Unterschrift(en)

M. Reinert

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich. Durch die Unterschriften bürgen sie grundsätzlich gemeinsam für den gesamten Inhalt dieser schriftlichen Arbeit.

¹ z. B. ChatGPT, DALL E 2, Google Bard

² z. B. ChatGPT, DALL E 2, Google Bard

³ z. B. ChatGPT, DALL E 2, Google Bard