

Untersuchung zur Wiederansiedlung von Torfmoosen im Hochmoor «Zwischen Glaubenberg und Rossalp»

Bachelorarbeit



Foto: Nina Cramer

von Nina Cramer, Bsc. Umweltnaturwissenschaften ETH Zürich

betreut durch Florian Knaus, ITES, ETH Zürich

26.8.2019

1 Zusammenfassung

Moore sind bedeutende Lebensräume, weil sie Habitat für viele Pflanzen- und Tierarten bieten. Darüber hinaus sind sie grosse und langfristige CO₂-Senken, regulieren den Wasserhaushalt und wirken somit kühlend auf das Klima. Seit dem 19. Jahrhundert ist weltweit die Fläche der Moore stark geschrumpft. Sie wurden entwässert und bewirtschaftet, um Land für die wachsende Landwirtschaft und Bevölkerung zu gewinnen. Heute zählen Moore daher zu den meist gefährdeten Habitaten.

Moore werden in zwei verschiedene Typen unterteilt: in Flachmoore und Hochmoore. Hochmoore sind im Gegensatz zu Flachmooren sehr nährstoffarme und saure Lebensräume, da sie nicht in Kontakt mit dem Grundwasser stehen, welches Nährstoffe transportiert und den pH puffert. Sie beziehen ihre Nährstoffe nur aus dem Niederschlagswasser. Folglich können sich in Hochmooren ausschliesslich spezialisierte Pflanzenarten ansiedeln. Torfmoose gehören zu den typischen Pflanzenarten in Hochmooren. Sie machen den Grossteil der Vegetation aus und sind zudem verantwortlich für den Aufbau von Torf und somit für die langfristige Speicherung von Kohlenstoff im Boden.

In der Schweiz sind Hochmoore seit 1987 streng geschützt und daher konnte seitdem ein Flächenrückgang verhindert werden. Dennoch sind Hochmoore vielerorts degradiert und weisen einen schlechten Zustand auf. Eines dieser degradierten Hochmoore ist das Hochmoorobjekt Nr.257 «Zwischen Glaubenberg und Rossalp». Der Torfmoost Teppich ist in diesem Gebiet vielerorts verschwunden und der Boden weist eine nackte, trockene Torfoberfläche auf.

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist es, herauszufinden, wie die Torfmoose auf den nackten Torfoberflächen wiederangesiedelt werden können und wie ihr Wachstum gefördert werden kann. Dazu wurde zwischen 2018 und 2019 ein Experiment mit verschiedenen Treatments im südlichen degradierten Teilobjekt des Gebietes durchgeführt. Für jedes Treatment wurde die Torfmoosfrequenz aufgenommen. Zusätzlich wurden weitere biotische und abiotische Variablen aufgenommen und die Torfmoosarten bestimmt, welche sich im Experiment wiederansiedeln konnten, um die Torfmooswiederansiedlung zu erklären.

Die Analyse der Frequenz der Torfmoose und der weiteren Variablen ergab, dass die Torfmooswiederansiedlung am meisten Erfolg hat, wenn auf die nackten Torfoberflächen Torfmoosfragmente ausgestreut werden. Zudem ist es für das Wachstum der Torfmoose förderlich, wenn der Boden einen hohen Wassergehalt aufweist. Dies kann unter anderem durch das Ausbringen von Stroh als Verdunstungsschutz erfolgen. Die Untersuchung der Torfmoosartenzusammensetzung ergab, dass sich vor allem eine Art (*Sphagnum capillifolium*) durchsetzen konnte und eine erhöhte Wiederansiedlungsrate aufweist.

Für eine effiziente Etablierung des Torfmoost Teppichs auf den nackten Torfoberflächen im Hochmoor «Zwischen Glaubenberg und Rossalp» ist es daher zu empfehlen, Torfmoosfragmente der trockenheitstoleranten Art *Sphagnum capillifolium* auszustreuen. Zudem sollte dafür gesorgt werden, dass das Gebiet einen hohen Wassergehalt aufweist. Dies kann durch das Aufstauen der Entwässerungsrinnen oder durch das Ausstreuen von Stroh auf die Torfmoosfragmente erreicht werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung	2
2	Einleitung	4
2.1	<i>Entstehung von Hochmooren</i>	4
2.2	<i>Bedeutung von Hochmooren</i>	4
2.3	<i>Renaturierung von Hochmooren</i>	5
2.4	<i>Ziel und Aufbau der Arbeit</i>	5
3	Methoden und Vorgehen	6
3.1	<i>Untersuchungsgebiet</i>	6
3.2	<i>Aufbau des Experiments</i>	8
3.3	<i>Vegetationsaufnahme</i>	9
3.3.1	<i>Frequenzbestimmung</i>	9
3.3.2	<i>Artenliste</i>	10
3.4	<i>Sphagnum-Artenzusammensetzung</i>	10
3.5	<i>Weitere Variablen</i>	10
3.5.1	<i>Wasserstand</i>	10
3.5.2	<i>Bodenanalyse</i>	11
3.6	<i>Statistische Auswertung</i>	11
4	Resultate	12
4.1	<i>Artenvielfalt</i>	12
4.2	<i>Wintermortalität</i>	13
4.3	<i>Torfmoosbedeckung</i>	14
4.4	<i>Sphagnum-Artenzusammensetzung</i>	15
5	Diskussion	17
5.1	<i>Wiederansiedlung von Torfmoosen</i>	17
5.1.1	<i>Wintermortalität</i>	19
5.2	<i>Sphagnum-Artenzusammensetzung</i>	19
5.3	<i>Diskussion der statistischen Auswertung</i>	19
6	Dank	21
7	Literaturverzeichnis	22
8	Anhang	24
8.1	<i>Bodenanalyse</i>	24
8.2	<i>R-Outputs</i>	24
9	Eigenständigkeitserklärung	29

2 Einleitung

2.1 Entstehung von Hochmooren

Moore entstehen in Gebieten, in denen der Boden vollständig mit Wasser gesättigt ist (Küchler et al. 2018). Die hohe Wassersättigung entsteht dadurch, dass der Wassereintrag ins Gebiet höher ist als der Abfluss. Dies kann z.B. durch Verlandung von Gewässern, stauende Bodenschichten, viel Niederschlag und/oder grosse Zuflüsse entstehen. Wegen des hohen Wassergehalts im Boden wird der Untergrund sauerstoffarm und nur spezialisierte Pflanzengesellschaften können sich unter diesen Bedingungen etablieren. Aufgrund ihrer Entstehung, Nährstoffgehalt, Wasserregime und Vegetationstyp können Moore in Flachmoore und Hochmoore unterteilt werden (Klaus 2007). Hochmoore sind sehr nährstoffarme und saure Lebensräume, da sie ihre Nährstoffe nur aus dem Niederschlagswasser beziehen und nicht direkt in Kontakt mit dem mineralhaltigen Grundwasser stehen. Der Boden von Hochmooren hat eine grosse Wasserspeicherfähigkeit und ist vollständig mit Wasser gesättigt (BUWAL 2002; Rydin and Jeglum 2013; Wieder and Vitt 2006). Dies ist dem hohen Gehalt an Torf und dem hohen Wassergehalt der Torfmoose zu verdanken. Torfmoose (Gattung *Sphagnum*) machen den Hauptanteil der Vegetation von Hochmooren aus. Sie sind nicht nur an die nährstoff- und sauerstoffarmen, nassen und sauren Bedingungen der Hochmoore angepasst, sondern schaffen aktiv einen solchen Lebensraum (Wieder and Vitt 2006). Bei der Aufnahme von Nährstoffen geben die Torfmoose H^+ -Ionen ab und versauern so ihre Umgebung (BUWAL 2002). Torfmoose können sehr viel Wasser in speziellen Wasserspeicherzellen, den Hyalozyten, speichern (Küchler et al. 2018; Wieder and Vitt 2006). Diese Hyalozyten können bis zum 15 - 20fachen ihres Trockengewichts an Wasser aufnehmen (Rydin and Jeglum 2013).

Torfmoose wachsen nur an ihrer Spitze (Capitulum) weiter und bilden dichte Moosteppiche (Küchler et al. 2018). Mit fortschreitendem Höhenwachstum nimmt die Lichtverfügbarkeit für den unteren Teil der Moose ab und die unteren Pflanzenteile sterben. Durch die sauren, nassen, sauerstoff- und nährstoffarmen Bedingungen ist der Abbau der abgestorbenen Pflanzenteile gehemmt (Chirino, Campeau, and Rochefort 2006). So wird Kohlenstoff (C) im Torf akkumuliert (BUWAL 2002; Klaus 2007; Küchler et al. 2018; Rydin and Jeglum 2013).

2.2 Bedeutung von Hochmooren

In der Schweiz sind seit dem 19. Jahrhundert fast 90% der Moore zerstört worden. So zählen Hochmoore zu den am stärksten bedrohten Habitaten der Schweiz (Delarze et al. 2016; Klaus 2007). Dabei besitzen sie sehr wichtige Ökosystemfunktionen, welche sie zu den wertvollsten Lebensräumen der Welt machen. Insbesondere Torfmoose spielen eine wichtige Rolle in Bezug auf diese Ökosystemfunktionen (Chirino, Campeau, and Rochefort 2006; Karofeld, Müür, and Vellak 2016). In gesunden Hochmooren wird durch den Aufbau von Torf viel C gespeichert. Weltweit sind im Torf und in den *Sphagnum*-Moosen ca. 150 Gigatonnen C gespeichert (Rydin and Jeglum 2013). Dies macht Hochmoore zu einer wichtigen und bleibenden CO_2 -Senke, welche beim globalen Kohlenstoffbudget ins Gewicht fallen und darum wichtig für den Klimaschutz sind (Aerts et al. 2001; Wieder and Vitt 2006). Zudem beugen sie aufgrund von ihrer hohen Wasserspeicherkapazität, bei Starkniederschlägen auch Überschwemmungen vor und können den Wasserhaushalt regional regulieren (BUWAL 2002; Holden et al. 2011; Küchler et al. 2018; Rydin and Jeglum 2013).

Aufgrund der extremen Bedingungen in Hochmooren können sich nicht viele Pflanzenarten etablieren, weshalb Hochmoore als generell artenarme Lebensräume gelten. Da sie aber eine grosse Diversität an Kleinstlebensräumen aufweisen, bieten sie eine Vielzahl an Mikrohabitaten und Nischen (BUWAL 2002; Klaus 2007; Wieder and Vitt 2006). Vor allem sehr spezialisierte Pflanzen- und Tierarten kommen in Hochmooren vor. Zudem bieten Hochmoore Lebensraum für viele bedrohte Pflanzen- und Tierarten, wie z.B. für den Langblättrigen Sonnentau *Drosera rotundifolia* die Blumenbinse *Scheuchzeria palustris* und mehrere Insektenarten (Klaus 2007; Küchler et al. 2018).

2.3 Renaturierung von Hochmooren

Seit der Rothenturm-Initiative im Jahr 1987 sind Moore und Moorlandschaften in der Schweiz geschützt. Trotzdem ist ein grosser Teil der Moore in einem schlechten Zustand (BUWAL 2002; Küchler et al. 2018). Durch eine Renaturierung können viele Moore wieder in einen natürlichen Zustand gebracht werden, in welchem sie ihre wichtigen Ökosystemfunktionen wieder erfüllen (Kammermann and Blankenburg 2008; Küchler et al. 2018). In Hochmooren erfolgt die Renaturierung meistens durch eine Aufstauung der Entwässerungsrinnen und/oder durch die Wiederinstandsetzung der hochmoortypischen Vegetation. Da die typische Hochmoorvegetation hauptsächlich aus Torfmoosen besteht und diese ihre Lebensraumbedingungen aktiv selbst kreieren, ist es elementar für ein Hochmoor, das Torfmooswachstum und die -Wiederansiedlung zu fördern (Staubli 2012). Torfmoose verbreiten sich entweder über Diasporen oder durch das Abfallen von Pflanzenteilen, welche am neuen Standort weiterwachsen. So kann die Wiederansiedlung von Torfmoosen durch Ausstreuen von Pflanzenfragmenten gefördert werden (Grosvernier, Matthey, and Buttler 1997; Wieder and Vitt 2006). Bei der Renaturierung durch Ausstreuen von Torfmoosfragmenten ist, laut Chirino, Champeau und Rochefort (2006) die Präsenz von trockenheitstoleranten Arten für die Etablierung des Moosteppichs wichtig. Die Arten, welche an trockenere Bedingungen angepasst sind, etablieren sich besser in degradierten Mooren und können dadurch den Lebensraum für andere Torfmoosarten aufbereiten. Somit kann langfristig die Artenvielfalt der Hochmoortorfmoose und auch die typische Zusammensetzung weiterer Arten wiederhergestellt werden (Rochefort 2000).

2.4 Ziel und Aufbau der Arbeit

Da Hochmoore wichtige Ökosysteme und in der Schweiz speziell und streng geschützt sind, sollen Massnahmen getroffen werden, um sie aufzuwerten und zu erhalten. Für das Hochmoorobjekt «Zwischen Glaubenberg und Rossalp», Nr. 257, der Kantone Luzern und Obwalden müssen Massnahmen entwickelt werden, da der Torfmoosteppich weitestgehend fehlt und aufgrund der fehlenden Wasserspeicherung eine natürliche Entwässerungsrinne entstanden ist (BAFU 1984). In der vorliegenden Arbeit wird die Wiederansiedlung von Torfmoosen als Renaturierungsmassnahme für das Hochmoorobjekt «Zwischen Glaubenberg und Rossalp», Nr.257, untersucht. Diese Arbeit ist eine Weiterführung des Experiments, welches im Sommer 2018 von Simone Frei im südlicheren Teil des Hochmoores (Teilobjekt 2) begonnen wurde. Im Rahmen des Experiments wurden verschiedene Treatments aufgesetzt, welche das Torfmooswachstum und die Wiederansiedlung fördern sollen. Gemäss Frei (2019), ist nach der ersten Vegetationsperiode im Sommer 2018 die Ansiedlung von Torfmoosen durch das Ausstreuen von Torfmoosfragmenten gelungen. Die Torfmoose zeigen ein höheres Wachstum und eine höhere Wiederansiedlungsrate, wenn sie mit Stroh bedeckt werden. Beim Experiment wurden in den Untersuchungsflächen die folgenden *Sphagnum*-Arten eingesetzt: *Sphagnum capillifolium*, *Sphagnum divinum*, *Sphagnum tenellum* und *Sphagnum flexuosum*, wobei nicht klar erhoben werden konnte, welche Arten sich durchsetzen konnten. Die ersten zwei Arten sind

typisch für Hochmoore und die anderen zwei Arten kommen vorwiegend in Übergangsmooren vor (Küchler et al. 2018).

Das Ziel dieser Arbeit und derjenigen von Simone Frei ist es, herauszufinden, wie Torfmoose in degradierten Mooren am besten wiederangesiedelt werden können. Diese Arbeit stellt die weitere Entwicklung des Experiments dar. Zudem werden weitere Erklärungsvariablen für den Wiederansiedlungserfolg von Torfmoosen geprüft und es wird untersucht, welche Torfmoosarten sich in den Experimentflächen wiederangesiedelt haben. Die Arbeit geht demnach folgenden Fragen nach:

- 1. Wie kann die Wiederansiedlung von Torfmoosen auf den krustigen und harten Oberflächen im Teilobjekt 2 des Hochmoorobjektes Nr. 257 ermöglicht, sowie unterstützt und gefördert werden?**
- 2. Wie ist die Artenzusammensetzung der Torfmoose im degradierten Hochmoor «Zwischen Glaubenberg und Rossalp» und welche Arten wachsen am besten auf den krustigen und harten Torfoberflächen?**

3 Methoden und Vorgehen

Um die zwei Forschungsfragen beantworten zu können, wurden drei verschiedene Untersuchungen durchgeführt. Zum einen wurde in den Untersuchungsflächen die Wiederansiedlung und das Wachstum der Torfmoose untersucht. Zum anderen wurde in den gleichen Untersuchungsflächen, die *Sphagnum*-Artenzusammensetzung erhoben. Um die Wiederansiedlung, das Wachstum und die Artenzusammensetzung der Torfmoose zu erklären, wurde neben den Treatments der Vegetationsperiode 2018 zusätzlich der Wasserstand, der pH-Wert, die elektrische Leitfähigkeit und die Konzentrationen verschiedener Elemente des Bodens analysiert.

3.1 Untersuchungsgebiet

Das Hochmoorobjekt Nr. 257 «Zwischen Glaubenberg und Rossalp» liegt an der Grenze zwischen den Kantonen Luzern und Obwalden (Abbildung 1). Die Experimente wurden nur im südlicheren Teil des Gebietes durchgeführt, da dieser Teil des Hochmoores stark degradiert ist (Staubli 2012).

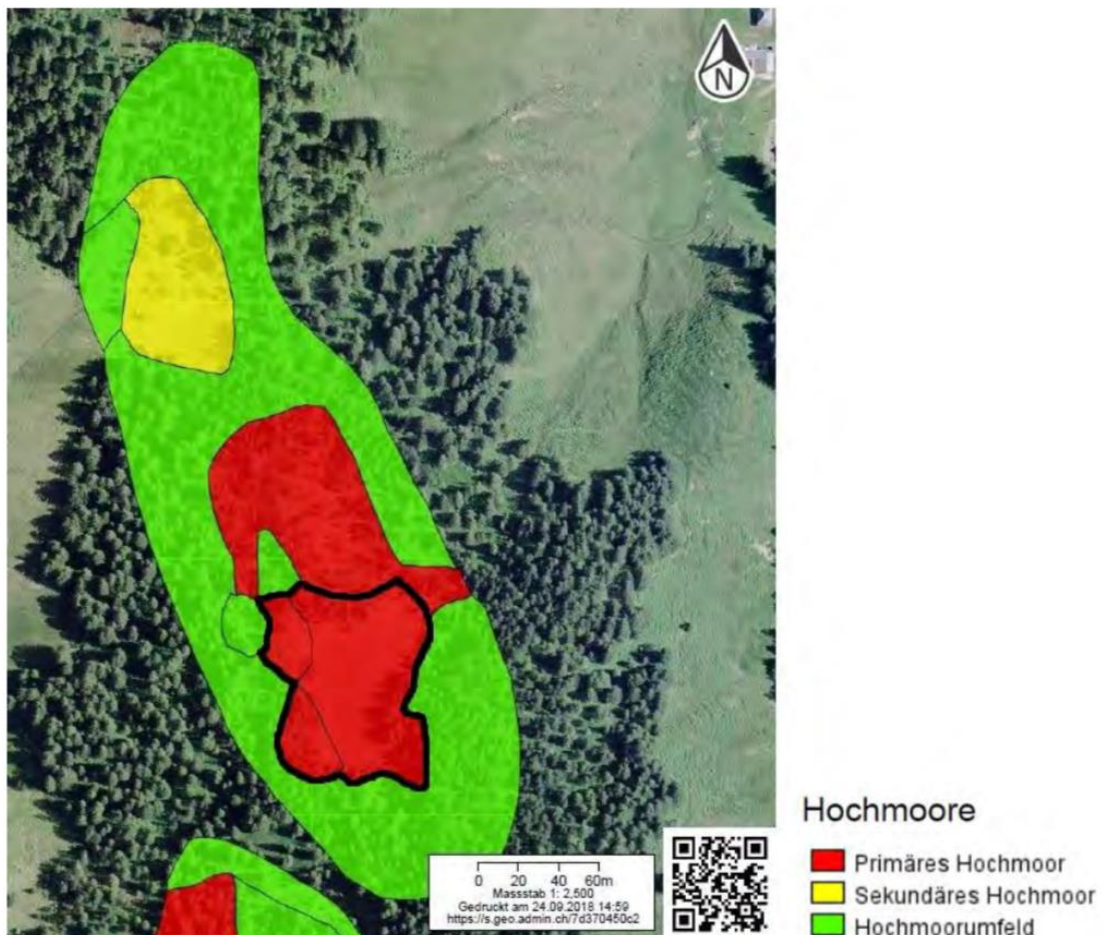


Abbildung 1: Überblick Hochmoor "Zwischen Glaubenberg und Rossalp". Schwarzumrandete Fläche ist das Untersuchungsgebiet dieser Studie (Frei 2019)

Das Untersuchungsgebiet ist ca. 0.35 ha gross und liegt vollständig im Kanton Luzern (swisstopo 2019). Stellenweise ist die typische Hochmoorvegetation in dieser Fläche nicht mehr vorhanden und die Oberfläche besteht aus hartem, krustigem und nacktem Torf (Abbildung 2). Diese Degradierung ist auf frühere Beweidung zurückzuführen. Die Trittbelastung durch das Vieh hat den Torfmoostepich zerstört, die darunterliegende Torfschicht wurde oxidiert und somit wurden die Bedingungen für das Torfmooswachstum verschlechtert. Dies führte dazu, dass Niederschlag hauptsächlich oberflächlich abfloss, was in erhöhter Erosion und vermehrter Trockenheit resultierte. Im Süden des Untersuchungsgebietes hat sich aufgrund der starken Erosion eine Rinne gebildet, welche das Gebiet entwässert (Abbildung 3) (BAFU 1984; Staubli 2012).



Abbildung 2: Krustige und harte Torfoberfläche.
Foto: Nina Cramer



Abbildung 3: Entwässerungsrinne, gebildet durch starke Erosion. Foto: Eva Frei

3.2 Aufbau des Experiments

Der experimentelle Aufbau dieser Studie ist der gleiche wie der von Frei (2019). Das Experiment besteht aus 20 Plots mit je 5 Untersuchungsflächen. Pro Untersuchungsfläche wurde im Jahr 2018, je eines der folgenden Treatments durchgeführt:

Tabelle 1: Treatments der Untersuchungsflächen (Frei 2019)

Treatment	Beschreibung
1. Kontrolle	Keine Eingriffe
2. Torfmoose	Torfmoosfragmente wurden ausgestreut. Damit soll die Wiederansiedlung der Torfmoose gefördert werden
3. Stroh	Auf die ausgestreuten Torfmoosfragmente wurde Stroh ausgebracht. Dies soll die Verdunstung des Wassers vermindern und somit eine höhere Wasserversorgung gewährleisten
4. Phosphor	Die ausgestreuten Torfmoose wurden zweimal mit einem Phosphordünger behandelt. Damit soll das Wachstum von Torfmoosen gefördert werden
5. Trichophorum	Torfmoosfragmente wurden ausgestreut. Zudem wurde das Gras <i>Trichophorum cespitosum</i> abgeschnitten und auf die Torfmoose gestreut. Dies sollte den Konkurrenzdruck durch <i>Trichophorum cespitosum</i> vermindern und, wie das Stroh-Treatment, die Feuchtigkeit erhöhen

Die Untersuchungsflächen wurden zufällig innerhalb des Plots festgelegt und die Treatments zufällig auf die Untersuchungsflächen innerhalb eines Plots angewendet. Für das Jahr 2019, und somit für die vorliegende Arbeit, wurden die Treatments nicht wiederholt. Damit wurde das experimentelle Design möglichst realitätsnah gestaltet, was einer einmaligen Renaturierung mit möglichst wenig Aufwand entspricht. Es war zudem in der ersten Begehung des Gebietes ersichtlich, dass die vorjährigen Treatments im Feld noch gut sichtbar waren, z.B. der Schnitt von *Trichophorum* oder das verteilte Stroh.

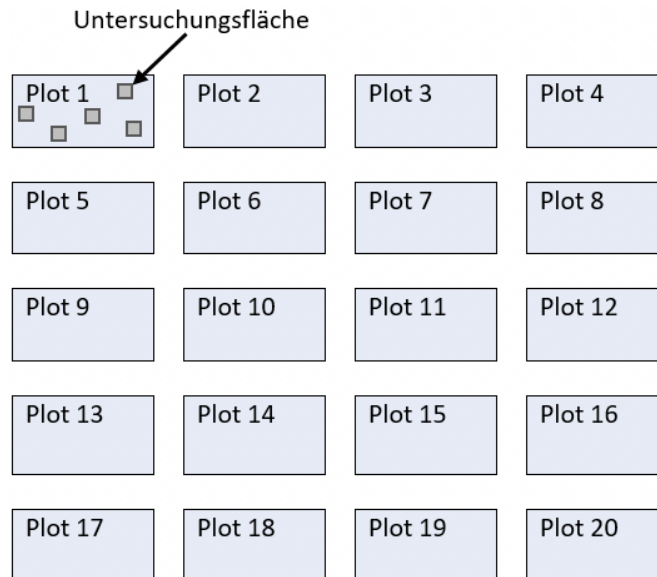


Abbildung 4: Überblick über die Anordnung der Plots und Untersuchungsflächen (Frei 2019)

Detailliertere Informationen zum Versuchsaufbau und zum Experiment sind der Arbeit von Frei (2019) zu entnehmen.

3.3 Vegetationsaufnahme

3.3.1 Frequenzbestimmung

Um das Wachstum der Torfmoose zu bestimmen, wurde eine Frequenzzählung in den Untersuchungsflächen identisch zu Frei (2019) durchgeführt. Dabei wurde ein Gitter mit 100 kleinen Quadraten von 5x5cm auf die Untersuchungsfläche gelegt. In jedem Quadrat wurde geschaut, ob Torfmoose, *Trichophorum cespitosum* oder sonstige Pflanzenarten vorhanden waren oder ob die Fläche keine Vegetation aufwies (leere Fläche). Für die Berechnung der Frequenz wurden dann alle Quadrate, in denen eine der oben genannten Pflanzentypen vorkommt, zusammengezählt und durch die Gesamtzahl der Quadrate geteilt:

$$\text{Frequenz} = \frac{\text{Anzahl Quadrate mit Pflanzentyp } X}{\text{Gesamtzahl der Quadrate}}$$

Mit der Frequenz konnte die Torfmoosbedeckung standardisiert beschrieben werden. Diese Frequenzbestimmung wurde zu Beginn und am Ende der Untersuchung, am 13. Juni 2019 und am 3. August 2019, für alle Untersuchungsflächen durchgeführt. Zusammen mit den Frequenzdaten von Frei (2019) von September 2018, diente die zweimalige Bestimmung dazu, einerseits die Wintermortalität der Torfmoose und andererseits die Entwicklung der Torfmoose während den beiden Vegetationsperioden zu erfassen.



Abbildung 5: Frequenzaufnahme mittels Gitter. Foto: Nina Cramer

3.3.2 Artenliste

Innerhalb der Plots wurden, zusätzlich zu den Frequenzbestimmungen, alle Pflanzenarten ausser den *Sphagnum*-Arten bestimmt und in eine Artenliste aufgenommen. Diese Artenliste soll zeigen, wie viele hochmoortypische Pflanzenarten in den Plots vorkommen und ob das Torfmooswachstum und die Wiederansiedlung erhöht sind, wenn viele verschiedene Hochmoorpflanzen vorkommen.

3.4 *Sphagnum*-Artenzusammensetzung

Um herauszufinden welche *Sphagnum*-Arten in den Untersuchungsflächen am meisten vorkommen und sich am besten verbreiten können, wurde der Flächenanteil der jeweiligen Torfmoosart an der gesamten Untersuchungsfläche bestimmt. Dazu wurde wiederum ein Gitter auf die Untersuchungsflächen gelegt und aufgenommen, in wie vielen Teilflächen die jeweilige *Sphagnum*-Art vorhanden ist. Auch hier wurde die Frequenz der jeweiligen *Sphagnum*-Art berechnet. Dazu wurden die Teilflächen, in der die jeweilige *Sphagnum*-Art vorkommt, gezählt und durch die Gesamtzahl der Teilflächen geteilt. So konnten die Deckungsgrade der *Sphagnum*-Arten in den Untersuchungsflächen bestimmt werden.

3.5 Weitere Variablen

3.5.1 Wasserstand

Da ein wassergesättigter Boden essentiell ist für das Wachstum und somit auch für die Wiederansiedlung von Torfmoosen (T. Haapalehto et al. 2014; T. O. Haapalehto et al. 2011; Price, Rochefort, and Quinty 1998), wurde der Wasserstand in den 20 Plots aufgenommen. Pro Plot wurde an einem repräsentativen Ort (keine Bulte, keine Schlenke) mit einem Torfbohrer (Durchmesser 5cm) ein 30cm tiefes Loch ausgestochen und darin der Wasserstand mit einem Meterstab, gemessen. Als Referenz für die Messungen wurde die Bodenoberfläche genommen. Dies bedeutet, dass der unterirdische Wasserstand als negative Zahl und stehendes Wasser über der Bodenoberfläche mit einer positiven Zahl angegeben wurde. Da sich der Wasserpegel im Loch nicht sofort dem des umliegenden Bodens angleicht, wurde die Messung des Wasserstandes vier Tage nach der Bohrung durchgeführt. Zudem wurde darauf geachtet, dass in diesen Tagen kein Regen fiel, da sonst der Wasserstand durch einflussendes Oberflächenwasser verfälscht wäre.

3.5.2 Bodenanalyse

Der Boden von Hochmooren ist in zwei unterschiedliche Bodenschichten geteilt; das Acrotelm und das Catotelm. Das Catotelm ist der torfige Unterboden, welcher konstant sauerstoffarm ist und daher wenig Leben beinhaltet. Das Acrotelm ist die obere und lebende Bodenschicht. Sie ist nur ca. 5-10 cm dick und in ihr laufen die wichtigen Prozesse für das Pflanzenwachstum ab (Aerts et al. 2001; Rydin and Jeglum 2013). Um die optimalen Wiederansiedlungs- und Wachstumsbedingungen für Torfmoose zu identifizieren, wurde pro Plot eine Bodenprobe entnommen. Dabei wurden nur die obersten 10cm des Bodens genommen, damit das gesamte Acrotelm in der Probe enthalten ist. Von den Bodenproben wurden folgende Parameter bestimmt:

Wassergehalt:

Um den Wassergehalt zu bestimmen, wurden die Bodenproben getrocknet und das Gewicht der Probe nach dem Trocknen vom Gewicht der Probe vor dem Trocknen abgezogen. Wenn der Boden wassergesättigt ist, was im Untersuchungsgebiet der Fall ist, kann die Bestimmung des Porenvolumens über den Wassergehalt erfolgen (Löw and Balderer 2004). Generell kann gesagt werden: je grösser die Poren sind, desto mehr Wasser ist im Torfboden gespeichert (Roskopf, Edom, and Zeitz 2016). Zudem ist die Porosität des Torfes ein wichtiges Mass für die Intaktheit eines Moores. Wenn der Boden verdichtet wird oder der Torf durch einen zu tiefen Wasserstand mit Luft in Kontakt kommt und oxidiert, kollabieren die Poren, werden kleiner und können weniger Wasser speichern (Holden et al. 2011). Zudem sind die Schwankungen des Wasserspiegels grösser, wenn die Poren kleiner sind. Dies wirkt sich negativ auf das Wachstum und die Wiederansiedlung der Sphagnum-Moose aus (Roskopf, Edom, and Zeitz 2016).

pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit:

Da Torfmoose vor allem unter sauren Bedingungen wachsen und eine Erhöhung des pH-Wertes und der elektrischen Leitfähigkeit auf eine Denaturierung des Moores hinweist, wurden pro Bodenprobe auch diese zwei Parameter aufgenommen (BUWAL 2002; T. Haapalehto et al. 2014; Klaus 2007; Küchler et al. 2018; Rydin and Jeglum 2013; Wieder and Vitt 2006).

Elementanalyse:

Für die Nährstoffanalyse wurden zwei verschiedene Methoden angewendet. Für die Bestimmung der Elementgehalte von Natrium (Na), Phosphor (P), Kalium (K), Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Kalzium (Ca) und Aluminium (Al) wurde ein Säureaufschluss, mit anschliessender Emissionsspektrometrie durchgeführt. Um zu analysieren, wie gross die Anteile von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S) in den Bodenproben sind, wurden die Bodenproben verbrannt. Das entstandene Gas wurde dann mittels Gas-Chromatograph analysiert, wodurch die Anteile der Elemente an der gesamten Bodenprobe bestimmt werden konnten. Detailliertere Informationen zur Elementanalyse sind im Anhang 9.1 aufgeführt.

3.6 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten wurde mit dem Programm R- Studio durchgeführt (R Core Team 2015). Für die Analyse der Torfmoosbedeckung wurde die Differenz der Frequenzen am Ende der Vegetationsperiode 2019 und am Anfang der Vegetationsperiode 2018 berechnet. So wurde die Torfmooswiederansiedlung über die gesamte Experimentzeit untersucht. Die Frequenz der Sphagnum-Artenzusammensetzung wurde nur für das Jahr 2019 berechnet, da diese Daten im Jahr 2018 nicht aufgenommen wurden. Für die Auswertung der Daten wurden hauptsächlich lineare (LM)

oder generalisierte lineare (GLM) und ANOVA- Modelle verwendet. Alle Modelle und Korrelationen wurden auf dem $\alpha= 0.05$ - Signifikanzlevel getestet. Da für die Erklärung des Torfmooswachstums und -Wiederansiedlung und der Sphagnum-Artenzusammensetzung viele verschiedene Variablen aufgenommen wurden, mussten diese Variablen noch auf ihre Relevanz für die jeweilige Zielvariable getestet werden. Dies erfolgte mit einem schrittweisen Algorithmus, welcher die AIC-Werte der Modelle vergleicht, wenn die Variablen dem Modell hinzugefügt oder weggenommen werden (Stat.ETHZ 2019). Die Variablen, welche den AIC-Wert verkleinern, werden im Modell belassen. Diejenigen welche den AIC-Wert erhöhen, erklären die Zielvariable nicht und gehören somit nicht ins Modell. Detailliertere Informationen zur statistischen Auswertung sind im Anhang 9.2 aufgeführt.

4 Resultate

4.1 Artenvielfalt

Bei der Vegetationsaufnahme innerhalb der Plots wurden folgende Pflanzenarten gefunden:

Tabelle 2: Gefundene Pflanzenarten in den Plots des Hochmoors «Zwischen Glaubenberg und Rossalp»

Art:	Vorkommen ¹ :
<i>Eriophorum vaginatum</i> (Scheiden-Wollgras)	Hochmoore
<i>Trichophorum cespitosum</i> (Rasenbinse)	Hochmoore
<i>Carex nigra</i> (Braun-Segge)	Flachmoore
<i>Drosera rotundifolia</i> (Rundblättriger Sonnentau)	Hochmoore
<i>Drosera intermedia</i> (Mittlerer Sonnentau)	Übergangsmoore
<i>Andromeda polifolia</i> (Rosmarinheide)	Hochmoore
<i>Vaccinium myrtillus</i> (Heidelbeere)	Moore und Moorwälder
<i>Vaccinium uliginosum</i> (Rauschbeere)	Hochmoore und Moorwälder
<i>Pinus mungo</i> (Bergföhre)	Wälder

¹ Quelle: (Info Flora 2019)

Die statistische Auswertung der Vegetationsdaten ergab, dass kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Torfmoosfrequenz und der totalen Anzahl von vorkommenden Arten besteht. Es können zwar Unterschiede in den Frequenzen der Torfmoose bei verschiedenen Anzahl Pflanzenarten festgestellt werden, aber diese Unterschiede sind nicht signifikant (T-Wert= 0.04, P-Wert= 0.97) (Abbildung 6).

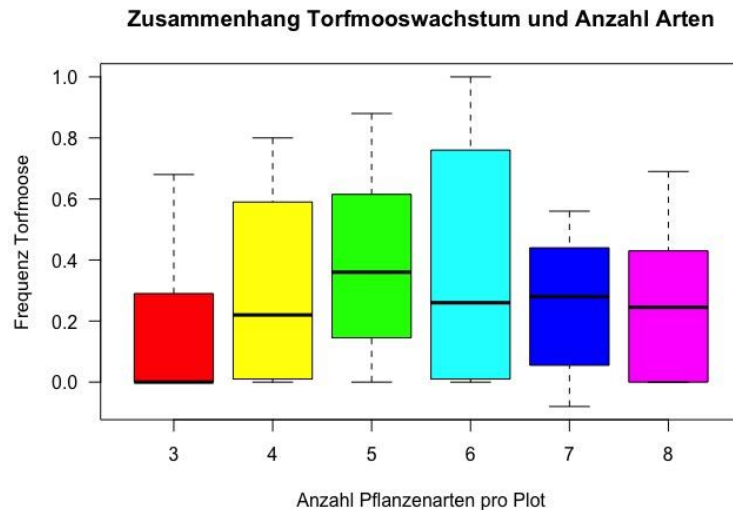


Abbildung 6: Zusammenhang zwischen Torfmoosfrequenz und totaler Anzahl Arten pro Plot

Als nächstes wurde die Frequenz der Torfmoose mit dem Vorkommen den einzelnen Arten aus Tabelle 2 korreliert. Diese Analyse ergab, dass die Torfmoosfrequenz mit dem Vorhandensein von intermediärem Sonnentau (F-Wert= 5.26, P-Wert= 0.02) und der Anwesenheit von Flechten (F-Wert= 7.51, P-Wert= 0.01) zusammenhängt. Da aber die Modellannahmen, dass die Fehler normalverteilt und deren Varianz konstant ist, verletzt wurden, kann keine Aussage über den Einfluss von hochmoortypischen Pflanzenarten auf die Torfmooswiederansiedlung gemacht werden.

4.2 Wintermortalität

Die Auswertung der Torfmoos-Frequenzen am Anfang der Vegetationsperiode 2019 und am Ende der Vegetationsperiode 2018 ergab, dass die Torfmoose über den Winter keine Mortalität, sondern einen Zuwachs aufweisen (Abbildung 7 und Abbildung 8). Der Unterschied zwischen den Mittelwerten der beiden Frequenzen ist signifikant (T-Wert= 5.42, P-Wert < 0.001). Der Mittelwert der Frequenzen über alle Treatments am Anfang 2019 ist 0.45 und der von Ende 2018 ist 0.24.

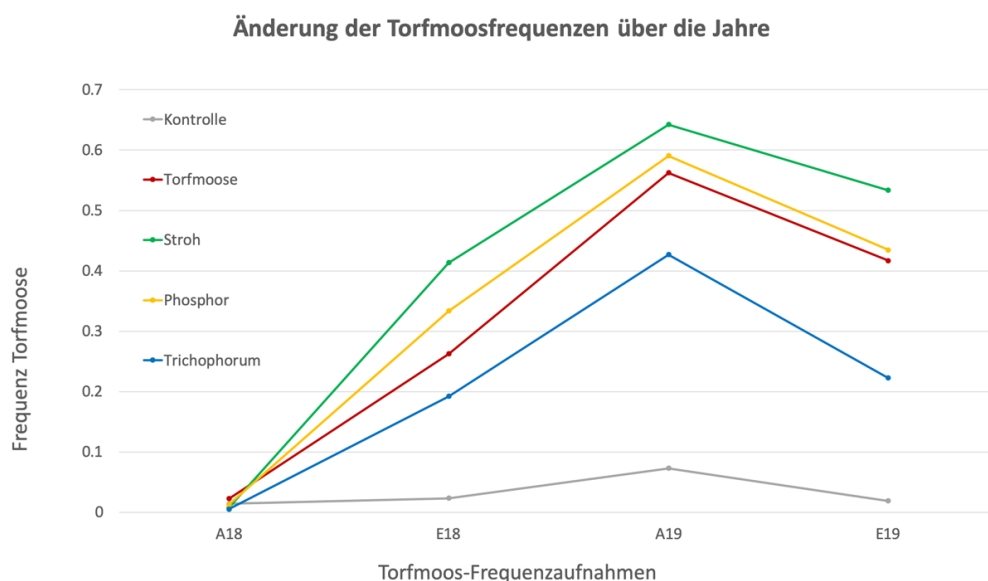


Abbildung 7: Änderung der Torfmoosfrequenzen über die Jahre 2018 und 2019, die verschiedenen Treatments sind farbig eingefärbt, A=Anfang, E=Ende der Vegetationsperiode

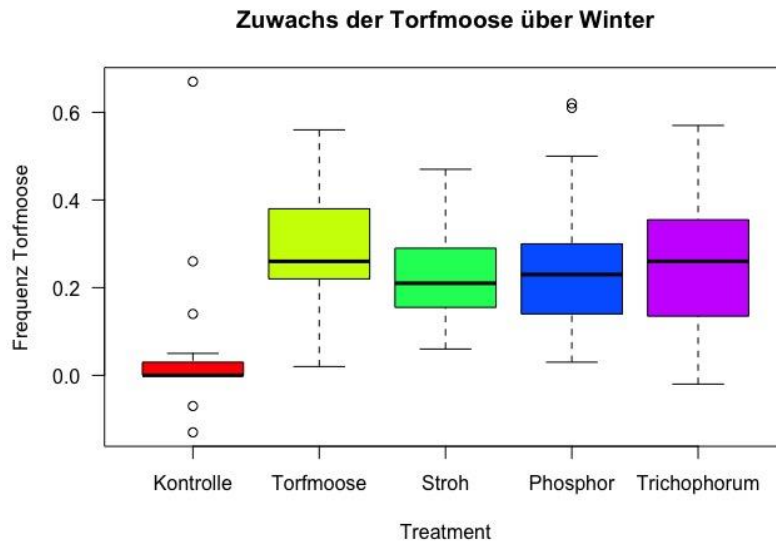


Abbildung 8: Zuwachs der Torfmoosfrequenz über den Winter 2018-2019 pro Treatment

Die Korrelation des Zuwachses mit den verschiedenen Treatments wurde in einem LM-Modell, mit der Variable «Plot» als zufällige Variable, getestet. Dieser Test ergab, dass kein signifikanter Zusammenhang des Winterzuwachses mit den Treatments besteht (Testresultate in Tabelle 6, Anhang 8.2). Die Modellannahmen dazu waren erfüllt (Abbildung 9 und Abbildung 10).

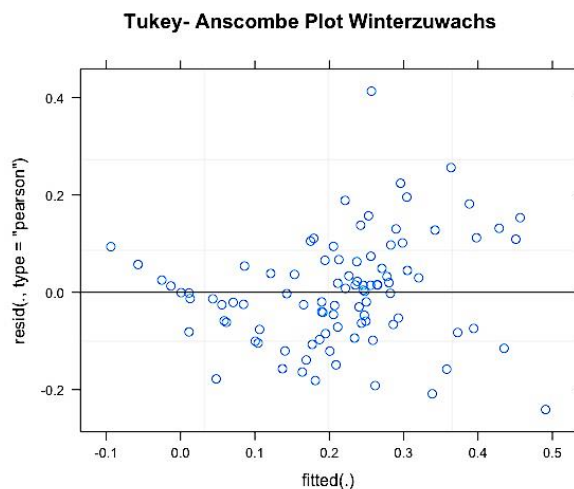


Abbildung 9: Tukey-Anscombe Plot der Residuen

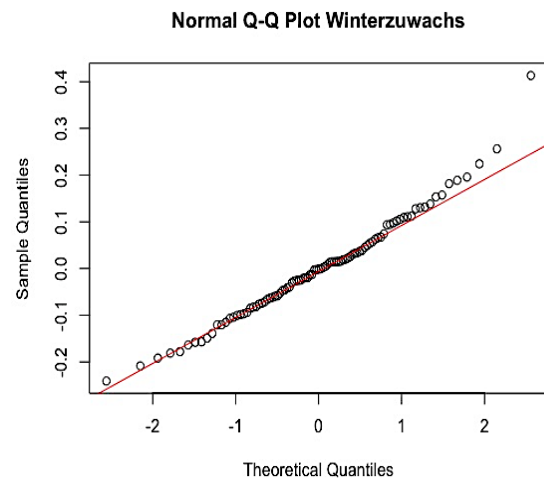


Abbildung 10: Q-Q-Plot der Quantile des Winterzuwachses

4.3 Torfmoosbedeckung

Um herauszufinden von welchen Faktoren die Frequenz der Torfmoose der beiden Untersuchungsjahre abhängt, wurde ein GLM-Modell mit der Frequenz der Torfmoose als Zielvariable, erstellt. Da für dieses Modell viele erklärende Variablen aufgenommen wurden, wurde ein schrittweiser AIC-Algorithmus verwendet, welcher die Variablen für das Modell basierend auf ihrer Relevanz auswählt. Das Resultat war, dass die Frequenz der Torfmoose signifikant vom pH-Wert, dem Wassergehalt, den Konzentrationen von Al, Fe, N, C und den Treatments abhängt (Tabelle 3). Es zeigt sich, dass der pH-Wert den grössten positiven Einfluss auf die Torfmoosfrequenz hat. Bei den

Treatments hat das Treatment Stroh den grössten positiven Einfluss, gefolgt vom den Treatments Phosphor und Torfmoose. Steigende Elementkonzentrationen haben alle einen negativen Einfluss auf die Torfmoosfrequenz.

Tabelle 3: Testergebnisse GLM-Modell der Torfmoosfrequenzen

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	P value
(Intercept)	3.60	1.77	2.03	0.05
Na	11.10	5.89	1.89	0.06
pH	2.79	1.05	2.66	<0.01
Wassergehalt	-0.02	0.01	-2.91	<0.01
Al	-0.65	0.21	-3.13	<0.01
Fe	-0.80	0.18	-4.56	<0.001
N	-0.72	0.15	-4.81	<0.001
C	-0.10	0.02	-5.67	<0.001
Treatment Torfmoose	0.39	0.06	6.33	<0.001
Treatment Stroh	0.52	0.06	8.35	<0.001
Treatment Phosphor	0.41	0.06	6.70	<0.001
Treatment Trichophorum	0.22	0.06	3.61	<0.001

Um herauszufinden, welches der Treatments die Wiederansiedlung und das Wachstum der Torfmoose am meisten fördert, wurden die Daten in einem Boxplot analysiert und zusätzlich die Mittelwerte der Frequenzen pro Treatment mittels T-Test miteinander verglichen. In Abbildung 11 ist deutlich zu sehen, dass das Stroh-Treatment den höchsten Median hat, gefolgt von den Treatments Phosphor und Torfmoose. Die Unterschiede der Mittelwerte zwischen den Treatments Torfmoose, Stroh und Phosphor sind nicht signifikant und befinden sich in einem ähnlichen Bereich. Die Unterschiede der Treatments Torfmoose, Stroh und Phosphor zu den Treatments Kontrolle und Trichophorum sind signifikant (Testresultate in Tabelle 7, Anhang 8.2).

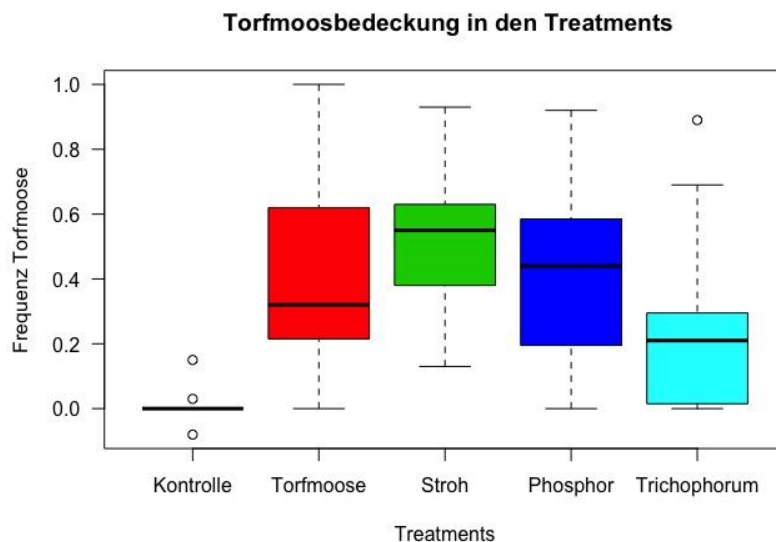


Abbildung 11: Torfmoosfrequenzen pro Treatment. Mittelwerte der Treatments: Kontrolle 0.02, Torfmoose 0.42, Stroh 0.53, Phosphor 0.44, Trichophorum 0.22

4.4 *Sphagnum*-Artenzusammensetzung

Die Frequenzen der einzelnen *Sphagnum*-Arten wurden mittels GLM-Modells auf ihren Zusammenhang mit den anderen Variablen getestet. Wiederum wurde ein schrittweiser AIC-

Algorithmus verwendet, um die relevanten Variablen ausfindig zu machen. Dies ergab folgende Resultate:

- *Sphagnum capillifolium*: Die Frequenz hängt signifikant vom Wasserstand, der Fe- und, C-Konzentration, den Treatments Torfmoose, Stroh, Phosphor und Trichophorum ab. Die Modellannahmen sind erfüllt, wodurch diese Zusammenhänge als wahr erachtet werden (Tabelle 4).

Tabelle 4: Testergebnisse des GLM-Modells zur Analyse von *S. capillifolium*

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	P value
(Intercept)	58.95	125.24	0.47	0.64
pH	172.74	90.30	1.91	0.06
N	-25.30	12.78	-1.98	0.05
Wasserstand_19	-1.01	0.36	-2.84	<0.01
C	-4.68	1.31	-3.56	<0.001
Fe	-57.37	15.84	-3.62	<0.001
Treatment Torfmoose	27.74	5.93	4.68	<0.001
Treatment Stroh	32.53	5.93	5.48	<0.001
Treatment Phosphor	29.05	5.93	4.90	<0.001
Treatment Trichophorum	20.16	5.93	3.40	<0.01

- *Sphagnum divinium*: Die Annahmen zu diesem Modell sind nicht erfüllt. Dadurch kann keine Aussage zu den Zusammenhängen der Frequenz von *S. divinium* mit den erklärenden Variablen gemacht werden.
- *Sphagnum tenellum*: Die Modellannahmen sind ebenfalls nicht erfüllt. Somit kann keine Aussage zu den Zusammenhängen der Frequenz von *S. tenellum* mit den anderen Variablen gemacht werden.
- *Sphagnum flexuosum*: Die Frequenz hängt signifikant mit der Na-, Al-, Fe-, und C-Konzentration und den Treatments Torfmoose, Stroh und Phosphor zusammen. Die Modellannahmen sind bis auf ein paar wenige Ausreisser erfüllt und somit können diese Zusammenhänge als korrekt erachtet werden (Tabelle 5).

Tabelle 5: Testergebnisse des GLM-Modells zur Analyse von *S. flexuosum*

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	P value
(Intercept)	346.52	78.57	4.41	<0.001
Na	1411.80	401.57	3.52	<0.001
Fe	-46.58	12.15	-3.83	<0.001
C	-5.16	1.26	-4.08	<0.001
N	-35.88	8.65	-4.15	<0.001
Treatment Torfmoose	14.16	5.43	2.61	0.01
Treatment Stroh	22.90	5.43	4.22	<0.001
Treatment Phosphor	18.63	5.43	3.44	<0.001
Treatment Trichophorum	3.26	5.43	0.60	0.55
Al	-59.76	12.40	-4.82	<0.001

Das Vorkommen der einzelnen Sphagnum-Arten im Zusammenhang mit den verschiedenen Treatments wurde mittels T-Tests untersucht. *Sphagnum capillifolium* kommt in grösster Häufigkeit

und in den meisten Treatments vor, gefolgt von *Sphagnum flexuosum* (Abbildung 12). Die Arten *S. divinium* und *S. tenellum* sind nur wenig vertreten und nicht in allen Treatments vorhanden. *S. capillifolium* zeigt den höchsten Mittelwert, gefolgt von *S. flexuosum*. Die Unterschiede der Mittelwerte zwischen den einzelnen Arten sind alle bis auf den zwischen *S. divinium* und *S. tenellum* signifikant (Testresultate in Tabelle 8, Anhang 8.2).

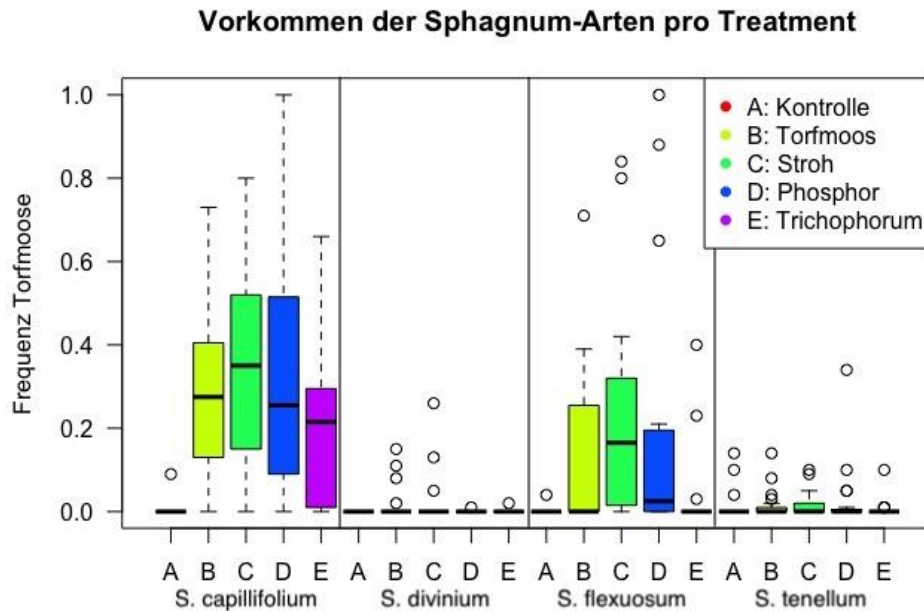


Abbildung 12: Vorkommen der einzelnen Sphagnum-Arten innerhalb der Treatments. Mittelwerte der einzelnen Sphagnum-Arten: *S. capillifolium* 0.22, *S. divinium* 0.01, *S. tenellum* 0.02, *S. flexuosum* 0.12

5 Diskussion

5.1 Wiederansiedlung von Torfmoosen

Für die Beantwortung der ersten Forschungsfrage, wie die Wiederansiedlung der Torfmoose auf den nackten Torfoberflächen gefördert werden kann, werden hier die Differenz der Torfmoosfrequenzen der Jahre 2018 bis 2019, die signifikanten Variablen aus dem statistischen Modell und die Treatments diskutiert. Da der Zusammenhang, welcher das Vorkommen hochmoortypischer Pflanzenarten auf die Torfmoosfrequenz hat, nicht eruiert werden konnte, wird dieser nicht in die Diskussion aufgenommen.

Die Resultate haben gezeigt, dass die Treatments Torfmoose, Stroh und Phosphor die höchste Wiederansiedlung an Torfmoosen aufgewiesen haben. Dies lässt sich dadurch erklären, dass bei diesen Treatments die Wiederansiedlung durch das Ausstreuen von Pflanzenmaterial gefördert worden ist. Beim Treatment Stroh wurde die Wiederansiedlung der Torfmoose zusätzlich durch das Ausbringen von Stroh unterstützt. Wie in der Studie von Price et al. (1998) erwähnt, speichert der Stroh das Niederschlagswasser und erhöht die Bodenfeuchtigkeit, was die Chance für eine Torfmooswiederansiedlung erhöht, da Torfmoose schlecht auf trockenen Oberflächen wachsen (Chirino, Campeau, and Rochefort 2006). Dies ist unter anderem auch eine Erklärung, weshalb die Torfmooswiederansiedlung in den Kontrolltreatments nicht funktioniert hat. In diesen Treatments

wurden weder Torfmoosfragmente ausgestreut, noch wurde das Wachstum durch andere Massnahmen gefördert. Somit konnte untersucht werden, ob sich die Torfmoose ohne Massnahmen auf der nackten Torfoberfläche wiederansiedeln können, was nicht der Fall war. Im Treatment Phosphor wurde das Wachstum der Torfmoose erfolgreich durch eine Nährstoffzufuhr unterstützt, was ebenfalls das Resultat in einem Experiment von Sottocornola et al. (2007) war. Das Treatment Trichophorum zeigte eine Wiederansiedlung, aber das Wachstum der Torfmoose war nur ca. halb so gross, wie dasjenige der Treatments Torfmoose, Stroh und Phosphor. Dies lässt möglicherweise dadurch erklären, dass durch das Abscheiden der Trichophorum-Halme ein Schutz vor Verdunstung entfernt wurde und so mehr Wasser verdunstet ist, was wiederum das Wachstum der Torfmoose gemindert hat. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass Trichophorum das Wachstum von Torfmoosen fördert und diese Förderung durch das Zurückschneiden der Trichophorum Sprosse weniger stark war. Ob dieser Zusammenhang besteht, müsste in weiteren Experimenten untersucht werden.

Die Analyse der Bodenparameter hat weiter ergeben, dass geringere Konzentrationen von Al, Fe, N, und C das Wachstum von Torfmoosen im Allgemeinen fördern. Diese Beobachtung stimmt mit einer Studie von Haapalehto et al. (2011) überein, welche höhere Al-, Fe- und N- Konzentrationen in degradierten Mooren, mit wenig Torfmoosbedeckung, gestörtem Wasserhaushalt und oxidierter Torfoberfläche gefunden haben. Da Hochmoore sehr nährstoffarme Lebensräume sind, stimmen die gefundenen Zusammenhänge zwischen Torfmooswachstum und Elementkonzentrationen mit der Theorie überein.

Das Resultat zum Wassergehalt stimmt nicht mit der Literatur überein, denn der Wassergehalt hat einen leicht negativen Effekt auf die Torfmoosfrequenz. In der Theorie sollte das Torfmooswachstum erhöht sein, wenn der Boden viel Wasser enthält (T. Haapalehto et al. 2014). Allerdings ist der gefundene Effekt sehr klein und kann daher in der Beantwortung der Frage vernachlässigt werden. Der Effekt des pH-Werts auf die Torfmoosfrequenz ist in dieser Untersuchung positiv. Das heisst, dass mit höherem pH-Wert die Torfmooswiederansiedlung erhöht ist. Dies stimmt auf den ersten Blick nicht mit der Theorie überein, welche für Hochmoore einen sehr tiefen Säuregehalt besagt. Allerdings wird in der Arbeit von Wieder und Vitt (2006) aufgeführt, dass pH-Werte unter 5.5 gut für das Wachstum und die Wiederansiedlung von *Sphagnum*-Moosen sind. Der Mittelwert der pH-Werte in der vorliegenden Untersuchung beträgt 3.85 und liegt somit unter dem kritischen Wert von 5.5. Der positive Effekt des pH-Wertes könnte somit dahingehend interpretiert werden, dass er bis zu einem Wert von 5.5 positiv auf das *Sphagnum*-Wachstum wirkt, danach jedoch negativ. Ob dieser Zusammenhang so stimmt, müsste jedoch untersucht werden.

Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass die Torfmooswiederansiedlung durch die Ausstreuung von Torfmoosfragmenten gefördert werden kann. Zudem ist es förderlich für die Wiederansiedlung der *Sphagnum*-Moose, wenn der Wassergehalt im Boden hoch ist. Dies kann durch das Aufstauen der bestehenden Entwässerungsrinne und/ oder durch das Ausstreuen von Stroh auf die verteilten Torfmoosfragmente erreicht werden. Durch den erhöhten Wassergehalt würde zudem der Torf weniger oxidieren und weniger Nährstoffe würden frei werden, was für das Torfmooswachstum langfristig förderlich wäre. Eine Düngung mit Phosphor ist für das Hochmoor «Zwischen Glaubenberg und Rossalp» nicht zu empfehlen, da dies mit einem hohen Aufwand einhergeht und das Phosphor Treatment keinen signifikant höheren Erfolg bei der Wiederansiedlung von Torfmoosen, als die Treatments Stroh und Torfmoose, gezeigt hat.

5.1.1 Wintermortalität

Die Resultate der Frequenzaufnahmen haben gezeigt, dass die Torfmoosbedeckung seit Beginn des Experimentes zugenommen hat. Auch über den Winter 2018- 2019 haben das Wachstum und die Ausbreitung der Torfmoose zugenommen. Dies lässt sich damit erklären, dass die Vegetationsperiode im September 2018 noch nicht beendet war und im Juni 2019 schon begonnen hatte. Zudem kann es sein, dass im Winter wenige bis keine Torfmoose abgestorben sind und somit keine, oder eine sehr geringe Wintermortalität vorhanden war. Zwischen den beiden Feldaufnahmen im Jahr 2019 ist die Frequenz der Torfmoose jedoch gesunken. Dies könnte auf die aussergewöhnlich starke Frühlingstrockenheit im Jahr 2019 zurückgeführt werden. Ein anderer Grund für die starke Zunahme der *Sphagnum*-Frequenz im Frühling 2019 könnte ein Fehler in den Daten sein: Einerseits wurden die Daten von unterschiedlichen Personen aufgenommen (Observer-Bias, siehe 5.3). Andererseits können im Frühling die lebendigen Torfmoose schnell mit den abgestorbenen verwechselt werden, da sie nicht kräftig grün, sondern eher bräunlich gefärbt sind. Zum Schluss des Jahres 2019 resultiert aber trotzdem eine signifikante Zunahme in der Frequenz der Torfmoose im Vergleich zu beiden Aufnahmen im Jahr 2018, ein allfälliger Fehler ändert die grundlegenden Aussagen und Kernresultate dieser Untersuchung somit nicht.

5.2 *Sphagnum*-Artenzusammensetzung

Für die Beantwortung der zweiten Forschungsfrage, wie die *Sphagnum*-Artenzusammensetzung ist und welche Torfmoosarten sich am besten durchsetzen konnten, werden die Resultate der Frequenzen der *Sphagnum*-Arten im Zusammenhang mit den signifikanten Variablen aus der statistischen Untersuchung und den Treatments diskutiert.

Die Untersuchung der Artenzusammensetzung ergab, dass die Art *S. capillifolium* sehr erfolgreich in der Wiederansiedlung ist. Ein möglicher Grund dafür ist, dass diese Art an trockenere Bedingungen angepasst ist und sich dadurch auf den nackten Torfoberflächen überleben kann (Grosvernier, Matthey, and Buttler 1997; Wieder and Vitt 2006). Die Arten *S. divinium* und *S. tenellum* kommen in den Untersuchungsflächen nur vereinzelt und in geringer Anzahl vor, da sie nicht an die trockenen Bedingungen von den offenen Torfoberflächen angepasst sind. Zudem kommen diese Arten vor allem in den nasseren und weniger degradierten Untersuchungsflächen des Untersuchungsgebietes vor. Die Art *S. flexuosum* kommt nur in ca. der Hälfte der Plots vor und dies auch in einer geringeren Anzahl als *S. capillifolium*. *S. flexuosum* kann sich, laut eigenen Beobachtungen, vor allem in den nasseren Plots wiederansiedeln und ist nicht so trockenheitstolerant wie *S. capillifolium*.

Die Art *S. capillifolium* kann somit in diesem Experiment als eine Pionierart angesehen werden. Sie kann folglich dazu eingesetzt werden den Lebensraum für die Wiederansiedlung von anderen *Sphagnum*-Arten aufzubereiten. Als Folge sollten sich in Zukunft auch andere Torfmoosarten in diesem Hochmoor etablieren können. Dieser Prozess sollte in einem zukünftigen Monitoring im Hochmoor «Zwischen Glaubenberg und Rossalp» weiter untersucht werden. Zudem könnten die Folgen einer Aufstauung der Entwässerungsrinne in Bezug auf die Artenzusammensetzung und die Torfmooswiederansiedlung weitere interessante Erkenntnisse liefern.

5.3 Diskussion der statistischen Auswertung

Da bei der Analyse der Daten viele Tests durchgeführt wurden, ist die Chance auf sogenannte Fehler der 1. Art erhöht. Dies würde bedeuten, dass ein signifikantes Resultat gefunden wurde, obwohl in Wirklichkeit kein sicherer Zusammenhang besteht. Daher sollten die p-Werte der Resultate vorsichtig betrachtet werden. Da aber in den Resultaten die p-Werte meist stark signifikant sind (p-

Wert <0.001), kann davon ausgegangen werden, dass diese Variablen wirklich einen Zusammenhang mit der Zielvariable aufweisen. Die Resultate der Analysen basieren auf beobachteten Daten, daher können keine Kausalitäten zwischen den Zielvariablen und den erklärenden Variablen abgeleitet werden. Die Vergleiche mit den theoretischen Zusammenhängen und anderen Resultaten experimenteller Studien ermöglicht es aber, die Resultate gut einzuordnen.

Die Daten zur Frequenzbestimmung wurden von zwei verschiedenen Personen aufgenommen: 2018 von Simone Frei und 2019 von Nina Cramer. Daher sind diese Aufnahmen nicht exakt vergleichbar, denn es ist ein gewisser Observer-Bias zu erwarten. Dieser wurde aber durch das Verwenden der gleichen Methode, mit sehr einfacher Methodik (ein Rahmen mit Unterteilungen, nur Präsenz-Absenz-Bestimmung in den Unterteilungen) minimiert. Es ist darum davon auszugehen, dass dieser Fehler minimal und vernachlässigbar ist und die Resultate nicht verfälscht.

6 Dank

Ich bedanke mich sehr herzlich bei Marco Griepentrog, der mich bei den Laborarbeiten und speziell bei der Analyse der Elementkonzentrationen, sehr gut unterstützt hat. Als nächstes will ich mich bei Eva Frei bedanken. Sie hat mich bei der Datenaufnahme begleitet und mir viele interessante Informationen zum Gebiet und zu den vorkommenden Pflanzenarten zur Verfügung gestellt. Natürlich bedanke ich mich auch bei Florian Knaus, der meine Fragen stets kompetent beantwortete und der mich in das Themengebiet der Hochmoore eingeführt und mich für dasselbe begeistert hat.

7 Literaturverzeichnis

- Aerts, Rien, Bo Wallén, Nils Malmer, and Hannie De Caluwe. 2001. "Nutritional Constraints on Sphagnum-Growth and Potential Decay in Northern Peatlands." *Journal of Ecology* 89(2): 292–99.
- BAFU. 1984. *Bundesinventar Der Hoch- Und Übergangsmoore von Nationaler Bedeutung*.
- BUWAL. 2002. *Moore Und Moorschutz in Der Schweiz*.
- Chirino, C., S. Campeau, and L. Rochefort. 2006. "Sphagnum Establishment on Bare Peat: The Importance of Climatic Variability and Sphagnum Species Richness." *Applied Vegetation Science* 9(2): 285.
- Delarze, Raymond et al. 2016. "Rote Liste Lebensräume- Gefährdete Lebensräume Der Schweiz."
- Frei, Simone. 2019. *Experimenteller Ansatz Zur Wiederansiedlung von Torfmoosen*.
- Grosvernier, P., Y. Matthey, and A. Buttler. 1997. "Growth Potential of Three Sphagnum Species in Relation to Water Table Level and Peat Properties with Implications for Their Restoration in Cut-Over Bog." *Society* 34(2): 471–83.
- Haapalehto, T., J. S. Kotiaho, R. Matilainen, and T. Tahvanainen. 2014. "The Effects of Long-Term Drainage and Subsequent Restoration on Water Table Level and Pore Water Chemistry in Boreal Peatlands." *Journal of Hydrology* 519(PB): 1493–1505.
- Haapalehto, Tuomas O. et al. 2011. "The Effects of Peatland Restoration on Water-Table Depth, Elemental Concentrations, and Vegetation: 10 Years of Changes." *Restoration Ecology* 19(5): 587–98.
- Holden, J., Z. E. Wallage, S. N. Lane, and A. T. McDonald. 2011. "Water Table Dynamics in Undisturbed, Drained and Restored Blanket Peat." *Journal of Hydrology* 402(1–2): 103–14.
- Info Flora. 2019. "Klassifikation TypoCH." <https://www.infoflora.ch/de/lebensraeume/typoch/2.2.4-bergangsmoor.html> (August 13, 2019).
- Kamermann, Dörte, and Joachim Blankenburg. 2008. "Erfahrungen Und Ergebnisse Eines Feldversuchs Im Project 'Torfmoos Als Nachwachsender Rohstoff.'" *Telma* (38): 121–44.
- Karofeld, Edgar, Mari Müür, and Kai Vellak. 2016. "Factors Affecting Re-Vegetation Dynamics of Experimentally Restored Extracted Peatland in Estonia." *Environmental Science and Pollution Research* 23(14): 13706–17.
- Klaus, Gregor. 2007. 0730 Bundesamt für Umwelt *Zustand Und Entwicklung Der Moore in Der Schweiz - Ergebnisse Der Erfolgskontrolle Moorschutz*.
- Küchler, Meinrad et al. 2018. *Moore Der Schweiz: Zustand, Entwicklung, Regeneration*. Zürich, Bern.
- Löw, Simon, and Werner Balderer. 2004. *Grundzüge Der Hydrogeologie*.
- Price, Jonathan, Line Rochefort, and Francois Quinty. 1998. "Energy and Moisture Considerations on Cutover Peatlands: Surface Microtopography, Mulch Cover and Sphagnum Regeneration." *Ecological Engineering* 10(4): 293–312.
- R Core Team. 2015. "R: The R Project for Statistical Computing." <https://www.r-project.org/> (August 12, 2019).
- Rochefort, Line. 2000. "Sphagnum —A Keystone Genus in Habitat Restoration." *The Bryologist* 103(3): 503–8.
- Roskopf, Niko, Frank Edom, and Jutta Zeitz. 2016. "Hydraulische Eigenschaften Unterschiedlicher Sphagnum -Torfe Hydraulic Properties of Different Sphagnum Peats." : 61–82.
- Rydin, Hakan, and John K. Jeglum. 2013. *The Biology of Peatlands*. 2nd ed. New York: Oxford University Press.

- Sottocornola, Matteo, Stéphanie Boudreau, and Line Rochefort. 2007. "Peat Bog Restoration: Effect of Phosphorus on Plant Re-Establishment." *Ecological Engineering* 31(1): 29–40.
- Stat.ETHZ. 2019. "R: Choose a Model by AIC in a Stepwise Algorithm." <https://stat.ethz.ch/R-manual/R-devel/library/MASS/html/stepAIC.html> (August 12, 2019).
- Staubli, Peter. 2012. *Moor-Regeneration Zwischen Glauenberg Und Rossalp*.
- swisstopo. 2019. *Karten Der Schweiz - Schweizerische Eidgenossenschaft*.
https://map.geo.admin.ch/?lang=de&topic=ech&bgLayer=ch.swisstopo.swissimage&layers=ch.swisstopo.zeitreihen,ch.bfs.gebaeude_wohnungs_register,ch.bav.haltestellen-oev,ch.swisstopo.swisstm3d-wanderwege,KML%7C%7Chttps:%2F%2Fpublic.geo.admin.ch%2FclNPr-d8Qmqm (July 11, 2019).
- Wieder, Kelman, and Dale H Vitt. 2006. 188 Ecological Studies, Analysis and Synthesis *Boreal Peatland Ecosystems*.

8 Anhang

8.1 Bodenanalyse

Für die Nährstoffanalyse wurden zwei verschiedene Methoden angewendet. Für die Bestimmung der Elementgehalte von Schwefel (S), Phosphor (P), Kalium (K), Eisen (Fe), Magnesium (Mg), Mangan (Mn), Kalzium (Ca) und Zink (Zn) wurden 0.2g trockene, gemahlene Bodenprobe in einem Reagenzglas gegeben. Diese wurde anschliessend mit 2ml nanopure Wasser, 2ml 70%- iger Salpetersäure (HNO₃) und 6ml 37%- iger Salzsäure gemischt. Damit eine Reaktion stattfindet und die Elemente von den Säuren aus dem Boden gelöst werden, wurden die Reagenzgläser bei 120min für zwei Stunden gewärmt. Danach wurden die Proben filtriert und verdünnt, damit anschliessend die Wellenlänge der einzelnen Elemente mittels Emissionsspektromie gemessen werden kann. Die Intensität der einzelnen Wellenlängen schliesst dann auf den Anteil des Elementes in der Gesamtprobe zurück. Damit die Messungen von den Bodenproben vergleichbar sind, wurde die gleiche Methode auf einen Standardboden mit bekannten Konzentrationen, angewendet.

Um zu analysieren, wie gross die Anteile von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Schwefel (S) in den Bodenproben sind, wurde 0.15g trockene, gemahlene Bodenprobe verbrannt. Die entstandenen Gase (CO₂, N_xO und SO₂) wurden dann in einem Gas- Chromatographen analysiert und ihren Volumenanteil bestimmt. Auch hier wurde eine Probe mit Standardboden mitanalysiert, um die gemessenen Volumenanteile in einen Kontext zu setzen.

8.2 R-Outputs

Tabelle 6: Testresultate des LMER- Modells zur Wintermortalität und den verschiedenen Treatments

```
WMLmr <- lmer( WM_Sphagnum~ Treatment+ (1|Plot), data=dat)
```

```
REML criterion at convergence: -83.2
```

```
Scaled residuals:
```

```
   Min      1Q  Median      3Q      Max
-1.9792 -0.5980 -0.0113  0.4937  3.3963
```

```
Random effects:
```

```
Groups   Name              Variance Std.Dev.
Plot     (Intercept)  0.009473 0.09733
Residual                   0.014812 0.12170
```

```
Number of obs: 95, groups: Plot, 19
```

```
Fixed effects:
```

```
              Estimate Std. Error t value
(Intercept)    0.05211    0.03575   1.457
TreatmentTorfmoose  0.23421    0.03949   5.931
TreatmentStroh    0.17842    0.03949   4.519
TreatmentPhosphor  0.20000    0.03949   5.065
TreatmentTrichophorum 0.19421    0.03949   4.918
```

```
Correlation of Fixed Effects:
```

```
          (Intr) TrtmntTrf TrtmnS TrtmnP
TrtmntTrfms -0.552
TrtmntStrh  -0.552  0.500
TrtmntPhsph -0.552  0.500    0.500
TrtmntTrchp -0.552  0.500    0.500  0.500
```

Tabelle 7: Testresultate der T-Tests zwischen den verschiedenen Treatments

Kontrolle mit allen anderen testen

```
t.test(TorfmoosTreatment$Kontrolle, TorfmoosTreatment$Torfmoos)
```

```
## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Kontrolle and TorfmoosTreatment$Torfmoos
## t = -6.175, df = 19.861, p-value = 5.098e-06
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -53.25074 -26.34926
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##      1.9      41.7
```

```
t.test(TorfmoosTreatment$Kontrolle, TorfmoosTreatment$Stroh)
```

```
## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Kontrolle and TorfmoosTreatment$Stroh
## t = -10.125, df = 20.403, p-value = 2.095e-09
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -62.03649 -40.86351
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##      1.90     53.35
```

```
t.test(TorfmoosTreatment$Kontrolle, TorfmoosTreatment$Phosphor)
```

```
## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Kontrolle and TorfmoosTreatment$Phosphor
## t = -6.6393, df = 19.914, p-value = 1.868e-06
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -54.608 -28.492
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##      1.90     43.45
```

```
t.test(TorfmoosTreatment$Kontrolle, TorfmoosTreatment$Trichophorum)
```

```
## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Kontrolle and TorfmoosTreatment$Trichophorum
## t = -3.5448, df = 20.091, p-value = 0.002022
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -32.32161 -8.37839
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##      1.90     22.25
```

Torfmoos mit allen anderen testen

```
t.test(TorfmoosTreatment$Torfmoos, TorfmoosTreatment$Stroh)
```

```
## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Torfmoos and TorfmoosTreatment$Stroh
```

```

## t = -1.4392, df = 35.932, p-value = 0.1587
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -28.067752  4.767752
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##  41.70    53.35

t.test(TorfmoosTreatment$Torfmoos, TorfmoosTreatment$Phosphor)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Torfmoos and TorfmoosTreatment$Phosphor
## t = -0.19706, df = 37.966, p-value = 0.8448
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -19.7285  16.2285
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##  41.70    43.45

t.test(TorfmoosTreatment$Torfmoos, TorfmoosTreatment$Trichophorum)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Torfmoos and TorfmoosTreatment$Trichophorum
## t = 2.2818, df = 37.477, p-value = 0.02827
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
##  2.186245 36.713755
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##  41.70    22.25

# Stroh mit allen anderen testen
t.test(TorfmoosTreatment$Stroh, TorfmoosTreatment$Phosphor)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Stroh and TorfmoosTreatment$Phosphor
## t = 1.2458, df = 36.376, p-value = 0.2208
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -6.210366 26.010366
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##  53.35    43.45

t.test(TorfmoosTreatment$Stroh, TorfmoosTreatment$Trichophorum)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Stroh and TorfmoosTreatment$Trichophorum
## t = 4.1216, df = 37.413, p-value = 0.0002006
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
##  15.81664 46.38336
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##  53.35    22.25

```

```

# Phosphor mit Trichophorum testen
t.test(TorfmoosTreatment$Phosphor, TorfmoosTreatment$Trichophorum)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: TorfmoosTreatment$Phosphor and TorfmoosTreatment$Trichophorum
## t = 2.5288, df = 37.706, p-value = 0.01575
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
##  4.224417 38.175583
## sample estimates:
## mean of x mean of y
##  43.45    22.25

```

Tabelle 8: Testresultate der T-Tests zwischen den verschiedenen Sphagnumarten über alle Untersuchungsflächen

```

## S.capillifolium:
t.test(dat$S.capillifoliumfreq,dat$S.diviniumfreq)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: dat$S.capillifoliumfreq and dat$S.diviniumfreq
## t = 9.0826, df = 98.684, p-value = 1.123e-14
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
##  0.1679873 0.2619075
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 0.223684211 0.008736842

t.test(dat$S.capillifoliumfreq,dat$S.flexuosumfreq)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: dat$S.capillifoliumfreq and dat$S.flexuosumfreq
## t = 3.2083, df = 187.6, p-value = 0.00157
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
##  0.03993271 0.16743571
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 0.2236842 0.1200000

t.test(dat$S.capillifoliumfreq,dat$S.tenellumfreq)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: dat$S.capillifoliumfreq and dat$S.tenellumfreq
## t = 8.6879, df = 101.59, p-value = 6.615e-14
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
##  0.1598605 0.2544553
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 0.22368421 0.01652632

## S.divinium:
t.test(dat$S.diviniumfreq,dat$S.flexuosumfreq)

```

```

## Welch Two Sample t-test
##
## data: dat$S.diviniumfreq and dat$S.flexuosumfreq
## t = -4.9193, df = 99.139, p-value = 3.455e-06
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.15614087 -0.06638544
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 0.008736842 0.12000000

t.test(dat$S.diviniumfreq,dat$S.tenellumfreq)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: dat$S.diviniumfreq and dat$S.tenellumfreq
## t = -1.3033, df = 177.98, p-value = 0.1942
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## -0.019584050 0.004005103
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 0.008736842 0.016526316

## S.flexuosum:
t.test(dat$S.flexuosumfreq,dat$S.tenellumfreq)

## Welch Two Sample t-test
##
## data: dat$S.flexuosumfreq and dat$S.tenellumfreq
## t = 4.5374, df = 102.33, p-value = 1.555e-05
## alternative hypothesis: true difference in means is not equal to 0
## 95 percent confidence interval:
## 0.05824305 0.14870432
## sample estimates:
## mean of x mean of y
## 0.12000000 0.01652632

```

9 Eigenständigkeitserklärung



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Eigenständigkeitserklärung

Die unterzeichnete Eigenständigkeitserklärung ist Bestandteil jeder während des Studiums verfassten Semester-, Bachelor- und Master-Arbeit oder anderen Abschlussarbeit (auch der jeweils elektronischen Version).

Die Dozentinnen und Dozenten können auch für andere bei ihnen verfasste schriftliche Arbeiten eine Eigenständigkeitserklärung verlangen.

Ich bestätige, die vorliegende Arbeit selbständig und in eigenen Worten verfasst zu haben. Davon ausgenommen sind sprachliche und inhaltliche Korrekturvorschläge durch die Betreuer und Betreuerinnen der Arbeit.

Titel der Arbeit (in Druckschrift):

Untersuchung zur Wiederansiedlung von Torfmoosen im Hochmoor „Zwischen Glaubenberg und Rossalp“

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Cramer

Vorname(n):

Nina

Ich bestätige mit meiner Unterschrift:

- Ich habe keine im Merkblatt „[Zitier-Knigge](#)“ beschriebene Form des Plagiats begangen.
- Ich habe alle Methoden, Daten und Arbeitsabläufe wahrheitsgetreu dokumentiert.
- Ich habe keine Daten manipuliert.
- Ich habe alle Personen erwähnt, welche die Arbeit wesentlich unterstützt haben.

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

Ort, Datum

Zürich, 25. August 2019

Unterschrift(en)

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