

Wiederansiedlung von Torfmoosen im Gebiet Glaubenberg



Projektabschlussbericht

Lena Meyer & Florian Knaus

07.12.2022

1 Ausgangslage

Hochmoore gehören zu den wertvollsten Lebensräumen der Welt: Sie fungieren als CO₂-Senke (Aerts et al., 2001), können bei Starkregen durch ihre Wasserspeicherkraft Überschwemmungen verhindern (Holden et al., 2011) und bieten einen Lebensraum für viele bedrohte Pflanzen- und Tierarten (Klaus, 2007). Gleichzeitig gehören Hochmoore zu den am stärksten bedrohten Habitaten in der Schweiz. Gemäss Klaus (2007) ist die Fläche der Schweizer Hochmoore im letzten Jahrhundert um rund 90% zurückgegangen. Um diese Flächen zu schützen und einen weiteren Rückgang zu verhindern, wurden 1987 die zu diesem Zeitpunkt noch als intakt taxierten Hoch- und Flachmoore durch die Rothenthurm-Initiative unter nationalen Schutz gestellt. Moore mit Vegetation von ausreichender Qualität und hinreichender Grösse wurden als Moore von nationaler Bedeutung inventarisiert und über Kantonale Schutzordnungen unter Schutz gestellt (Klaus, 2007). Das Objekt „Zwischen Glaubenberg und Rossalp“ (Inventarnummer 257) ist Teil dieses Inventars. Aufgrund der früheren Bewirtschaftung weist das Objekt stellenweise stark gestörte bis fehlende Hochmoorvegetation auf und entwässert auf mehreren Seiten. Dieser Zustand würde ohne Gegenmassnahme fortbestehen oder sich zusätzlich verschlechtern, was zum zunehmenden Verlust des Hochmoorcharakters führen würde (Staubli, 2012). Hauptprobleme des Moorobjektes sind das fehlende Acrotelm, also der lebende Teil des Hochmoores, das sich v.a. aus Torfmoosen zusammensetzt und über frischen, losen bis grossporigen Torf verfügt, der Wasserpegelschwankungen zulässt. Aktuell liegt das Catotelm frei, das kaum Wasserpegelschwankungen zulässt: Die installierten Wasserpegelmesser zeigen, dass der Wasserstand nur um ca. +/- 5cm schwankt. Bei Starkniederschlägen läuft das eingetragene Wasser somit direkt oberflächlich ab, was die Erosion stark antreibt (Abbildung 2). Eine reine Einstauung des Wassergrabens würde somit die Situation nur wenig verbessern, weil das Wasser einfach andernorts abfliessen würde. Das Moor ist somit auf den Aufbau eines intakten Acrotelms angewiesen, sprich, es muss vor einer Einstauung zwingend ein flächendeckendes Torfmooswachstum initiiert werden können. Um abzuklären, ob dies technisch möglich ist, wurde 2018 ein Experiment begonnen, welches sich mit folgender Frage beschäftigte:

Wie kann die Wiederansiedlung von Torfmoosen im Untersuchungsgebiet ermöglicht, sowie unterstützt und gefördert werden?

Diese Frage wurde 2018 mit einem experimentellen Forschungsdesign in zwei Bachelorarbeiten der ETH Zürich angegangen, in welchem der Erfolg von vier unterschiedlichen Treatments bei der Wiederansiedlung von Torfmoosen überprüft wurde. Nun, im fünften Jahr nach Beginn des Experiments, wurde eine letzte Bestandsaufnahme durchgeführt, um eine abschliessende Bilanz ziehen zu können. Das Experiment wurde im Anschluss daran abgeschlossen und alle Infrastruktur rückgebaut.

2 Methoden

Als Vorlage für die Durchführung der vorliegenden Abschlussuntersuchung dienen die Bachelorarbeiten von Simone Frei (2019) und Nina Cramer (2019). Die Methodik wird infolgedessen nur oberflächlich beschrieben und ein Fokus auf die in diesem Jahr (2022) erfolgten Erkenntnisse gelegt. Eine detaillierte Ausführung zur Methodik kann in den erwähnten Arbeiten gefunden werden.

2.1 Untersuchungsgebiet

Das Untersuchungsgebiet liegt im südlichen Teil des Hochmoorobjektes Nr. 257 „Zwischen Glaubenberg und Rossalp“ (siehe Abbildung 1). Die Oberfläche besteht aus hartem, krustigem und nacktem Torf, die typische Hochmoorvegetation ist stellenweise nicht mehr vorhanden. Diese Degradierung ist auf eine frühere Beweidung und anschließende Erosion zurückzuführen. Besonders deutlich ist die Erosion im Süden des Untersuchungsgebiet, wo sich eine tiefe Rinne gebildet hat, welche das Gebiet entwässert.

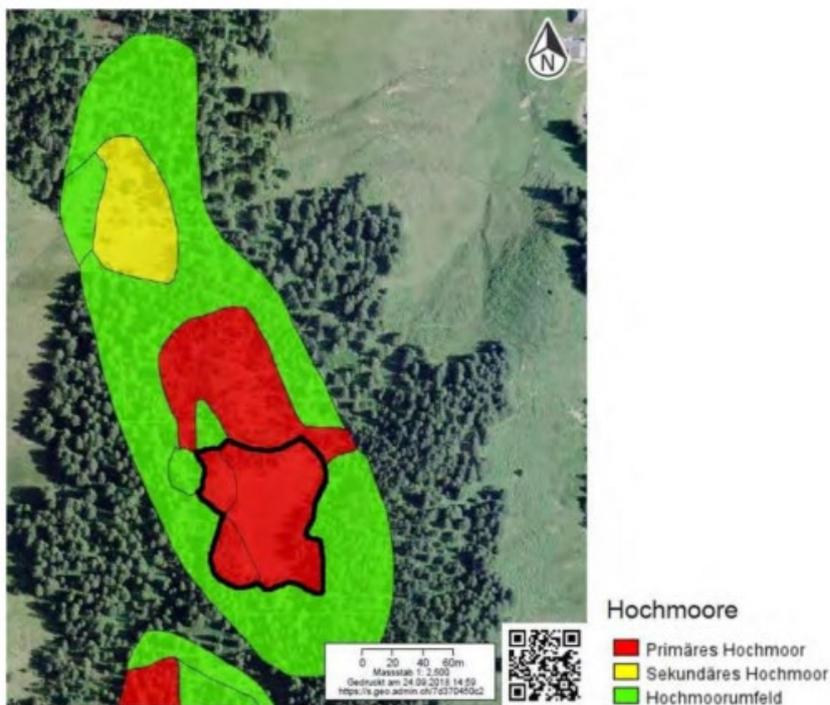


Abbildung 1: Überblick Hochmoor "Zwischen Glaubenberg und Rossalp". Schwarzumrandete Fläche ist das Untersuchungsgebiet dieser Studie (Frei 2019)



Abbildung 2: Oberflächenerosion und Rinne im Südwesten des Hochmoorobjekts (Blick in Fließrichtung) (Meyer 2022)

2.2 Aufbau des Experiments

Der experimentelle Aufbau dieser Studie übernimmt dasjenige von Frei (2019): Das Experiment wurde aus 20 Plots mit je 5 Untersuchungsflächen von 50 x 50 cm entworfen und umgesetzt. Die Untersuchungsflächen mit den jeweiligen Treatments wurden dabei zufällig innerhalb der Plots verteilt. Die dabei angewandten Treatments sind in Tabelle 1 aufgelistet. Die Treatments wurden in den Folgejahren nach Aufbau des Experiments nicht wiederholt, um eine reale, einmalige Renaturierung zu simulieren. Die 20 Plots und die Untersuchungsflächen wurden im Feld mit Hilfe von einem Klebeband-Farbcode nummeriert (siehe Tabelle 1 und 2).

Tabelle 1: Treatments der Untersuchungsfläche inkl. Farbcode im Feld (Frei 2019)

Treatment	Farbcode im Feld	Beschreibung
Kontrolle	Kein Klebeband	Keine Eingriffe
Torfmoose	Schwarz	Torfmoosfragmente wurden ausgestreut. Damit soll die Wiederansiedlung der Torfmoose gefördert werden
Stroh	Grün	Auf die ausgestreuten Torfmoosfragmente wurden Stroh ausgebracht. Dies soll die Verdunstung des Wassers vermindern und somit eine höhere Wasserversorgung gewährleisten
Phosphor	Blau	Die ausgestreuten Torfmoose wurden zweimal mit einem Phosphordünger behandelt. Damit soll das Wachstum von Torfmoosen gefördert werden
Trichophorum	Grau	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

Tabelle 2: Klebeband-Farbcode für die Plots (links)

Farbcode Plots							
1	1x gelb-grün	6	1x rot	11	1x weiss	16	1x braun
2	2x gelb-grün	7	2x rot	12	2x weiss	17	2x braun
3	3x gelb-grün	8	3x rot	13	3x weiss	18	3x braun
4	4x gelb-grün	9	4x rot	14	4x weiss	19	4x braun
5	5x gelb-grün	10	5x rot	15	5x weiss	20	5x braun

2.3 Datenaufnahme

Um die Entwicklung der Vegetation innerhalb der Untersuchungsflächen festzuhalten wurde eine Frequenzählung durchgeführt. Bei dieser Art von Vegetationsaufnahme wird die Untersuchungsfläche in regelmässige Teilflächen unterteilt und für jede Teilfläche wird notiert, ob eine Art präsent ist oder nicht. Dazu wurde ein Gitter mit 100 Quadraten von 5x5 cm auf die Untersuchungsfläche gelegt und in jedem Quadrat wurde bestimmt, ob Torfmoose und *Trichophorum cespitosum* vorhanden sind. Wenn das Quadrat keine Vegetation aufwies, wurde dies als Leere Fläche gezählt. Die Frequenz berechnet sich anschliessend wie folgt:

$$\text{Frequenz } f = \frac{\text{Anzahl der Teilflächen mit Anwesenheit der Art } X}{\text{Gesamtzahl der Teilflächen}}$$

Diese Frequenzbestimmung wurde von 22.- 25. August 2022 (E22) durchgeführt. Vor der diesjährigen, abschliessenden Feldaufnahme wurden im Rahmen der Bachelorarbeiten bereits folgende Aufnahmen gemacht: 22.– 23. Mai 2018 Aufnahme der Anfangsvegetation (A18), Aufnahmen am Ende der ersten Vegetationsperiode am 15.- 16. September 2018 (E18) von Frei und am 3. August von Cramer 2019 (E19).

Zusätzlich wurden die Plots Nr. 2, 7, 11 und 16 nach Vorbild von Frei (2019) fotografisch dokumentiert. Die Aufnahmen dienen dazu, optische Unterschiede zwischen den Plots zu Beginn des Experiments in 2018 und dem aktuellen Zustand machen zu können.

2.4 Statistische Auswertung

Die Statistische Auswertung orientiert sich an der Statistischen Auswertung von Frei (2019) und Cramer (2019). Dazu wurde das Programm R Version 3.6.3 zur Analyse verwendet. Es wurde die Differenz der Frequenz vom Torfmoos, vom *Trichophorum* und von der vegetationslosen Flächen zwischen der Anfangsvegetation berechnet und visualisiert. Ausserdem wurde die Präsenz der Vegetation über die gesamte Experimentdauer untersucht. Zur statistischen Analyse wurde nach Vorlage von Frei (2019) und Cramer (2019) folgendes linear gemischtes-Effekt Modell verwendet:

$$\sqrt{ToE22} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \sqrt{ToA18} + \beta_2 \cdot Tr_2 + \beta_3 \cdot Tr_3 + \beta_4 \cdot Tr_4 + \beta_5 \cdot Tr_5 + Pl + \varepsilon$$

Mit den Variablen:

- ToE22 = Frequenz(Torfmoose, Ende 2022)
- ToA18 = Frequenz(Torfmoose, Anfang 2018)
- β_i = Koeffizienten
- Tr_i = Treatments (1 = Kontrolle (wird in der Gleichung nicht aufgeführt), 2 = Torfmoose, 3 = Stroh, 4 = Phosphor, 5 = Trichophorum)
- Pl = Plots (zufälliger Effekt)
- ε = Fehlerterm

Im Gegensatz zu Frei (2019) habe ich das Treatment „Kontrolle“ in die Analyse einbezogen, da über 60 % der Kontrollflächen eine Veränderung aufweisen und die Torfmoos-Frequenz auf Kontrollflächen signifikant zugenommen hat zwischen Ende 2018 und Anfang 2022.

Mit Hilfe einer Residuenanalyse auf wurde überprüft, ob die Annahme des Modells erfüllt sind (Abbildung 3). Diese wurden nach Vorbild von Frei (2019) erstellt.

Der Quantil-Quantil-Plot (QQ-Plot) des Modell bildet die Quantile der Residuen des Experiments gegen die Quantile der Standardnormalverteilung ab (Abbildung 3.a). Dabei zeigt sich, dass die mittleren Datenpunkte der roten Trendlinie folgen. Die äusseren Punkte zeigen mehr Abweichung, daher wurde ein Resampling mit 100 Stichproben durchgeführt. Nach dem Resampling liegen alle Punkte innerhalb der Resampling-Linien. Die Modellannahme, dass der Fehlerterm ε einer Normalverteilung folgt, kann somit angenommen werden.

Gleichermassen wurde für die zufälligen Effekte vorgegangen (Abbildung 3.b). Dabei werden die Quantile der Residuen der zufälligen Effekte gegen die Quantile der Standardnormalverteilung abgebildet. Die äusseren Punkte weichen leicht von der roten Trendlinie ab, befinden sich aber innerhalb der Resamplinglinien (N=20). Somit ist keine systematische Abweichung von der Normalverteilung sichtbar.

Zuletzt wurde getestet, ob der Fehlerterm ε gleich Null ist (Abbildung 3.c). Dazu wurde ein Tukey-Anscombe-Plot erstellt. Bei Betrachtung zeigt sich eine Abweichung der roten Trendlinie von Null. Nach dem Resampling (N=100) liegen Stellen der roten Trendlinie teilweise ausserhalb der Resampling-Linien. Einen möglichen systematischen Fehler ist somit nicht auszuschliessen.

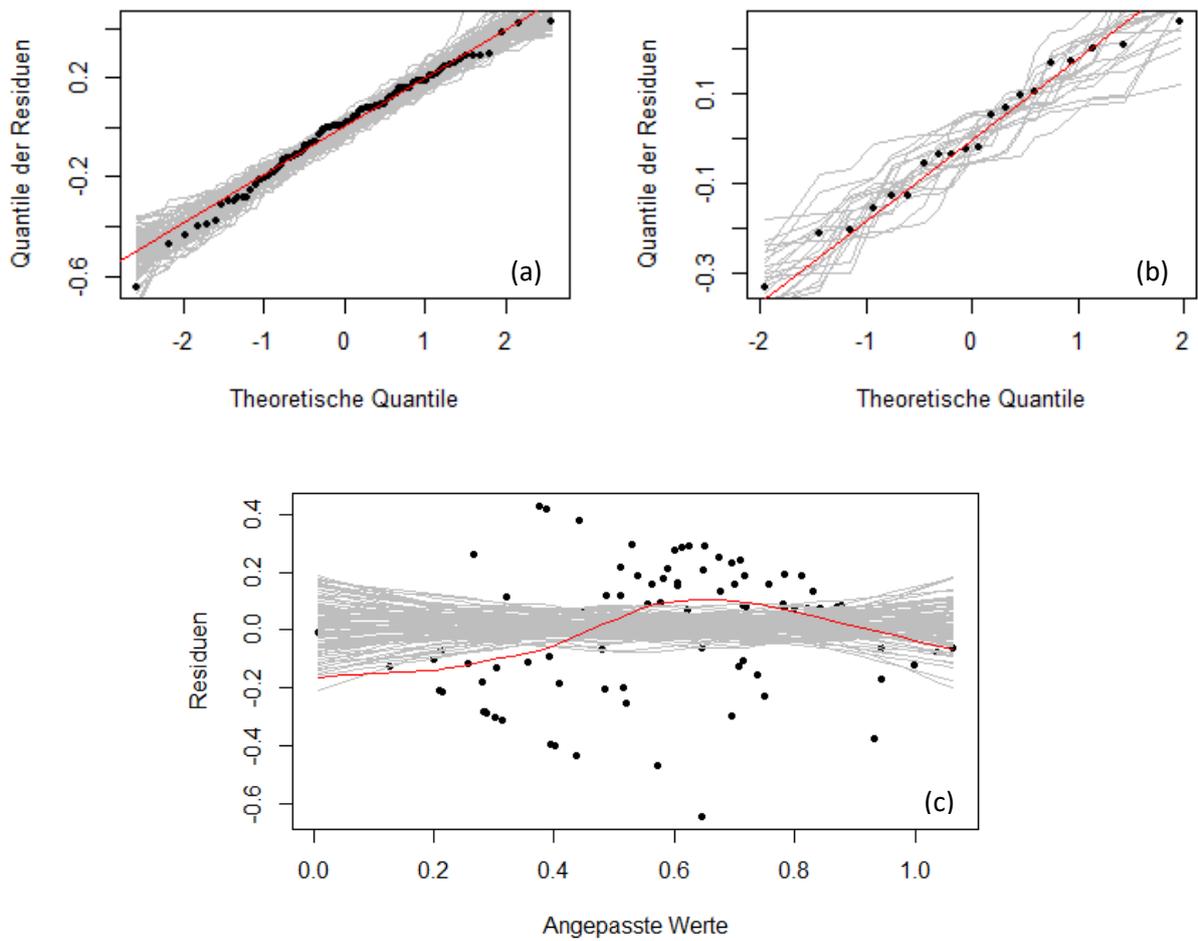


Abbildung 3: Residuenanalyse des linearen gemischten-Effekte Modells. Die Datenpunkte werden schwarz abgebildet. Die rote Linie bildet die Trendlinie, welche durch das 1. und 3. Quantil der Daten verläuft. Die grauen Linien stellen die Ergebnisse des Resamplings dar. (a) QQ-Plot des Modells (b) QQ-Plot der zufälligen Effekte (c) Tukey-Anscombe-Plot des Modells

Resultate

Seit Beginn des Experiments in 2018 konnten auf der Untersuchungsfläche erfolgreich Torfmoose angesiedelt werden. Auf allen Flächen wurde eine Zunahme von Torfmoosen beobachtet. Dabei waren insbesondere die Treatments „Stroh“ und „Phosphor“ erfolgreich in der Wiederansiedlung von Torfmoosen. Die Frequenz von *Trichophorum* hat ebenfalls zugenommen und eine Abnahme von vegetationsfreien Fläche wurde festgestellt.

3.1 Generelle Entwicklung

Über alle Plots und Untersuchungsflächen hinweg hat die Präsenz von Torfmoosen (T-Wert= 12.94, P-Wert < 0.001) und *Trichophorum* (T-Wert= 9.42, P-Wert < 0.001) signifikant zugenommen, während die vegetationslose Fläche im Untersuchungsgebiet signifikant abgenommen hat (T-Wert= -16.38, P-Wert < 0.001). Auf den beobachteten Untersuchungsflächen konnte somit eine generelle Vegetationszunahme mit Moorvegetation festgestellt werden. Aufgeteilt nach den verschiedenen Treatments zeigt sich eine klare Differenzierung: Dort wo Torfmoose aktiv ausgestreut wurden, hat die Deckung über die 5 Vegetationsperioden zugenommen (Abbildung 4), wobei dies in den Treatments Torfmoose, Stroh und Phosphor besonders ausgeprägt ist. Für *Trichophorum* und vegetationslose Flächen sind hingegen nur wenige Unterschiede ersichtlich.

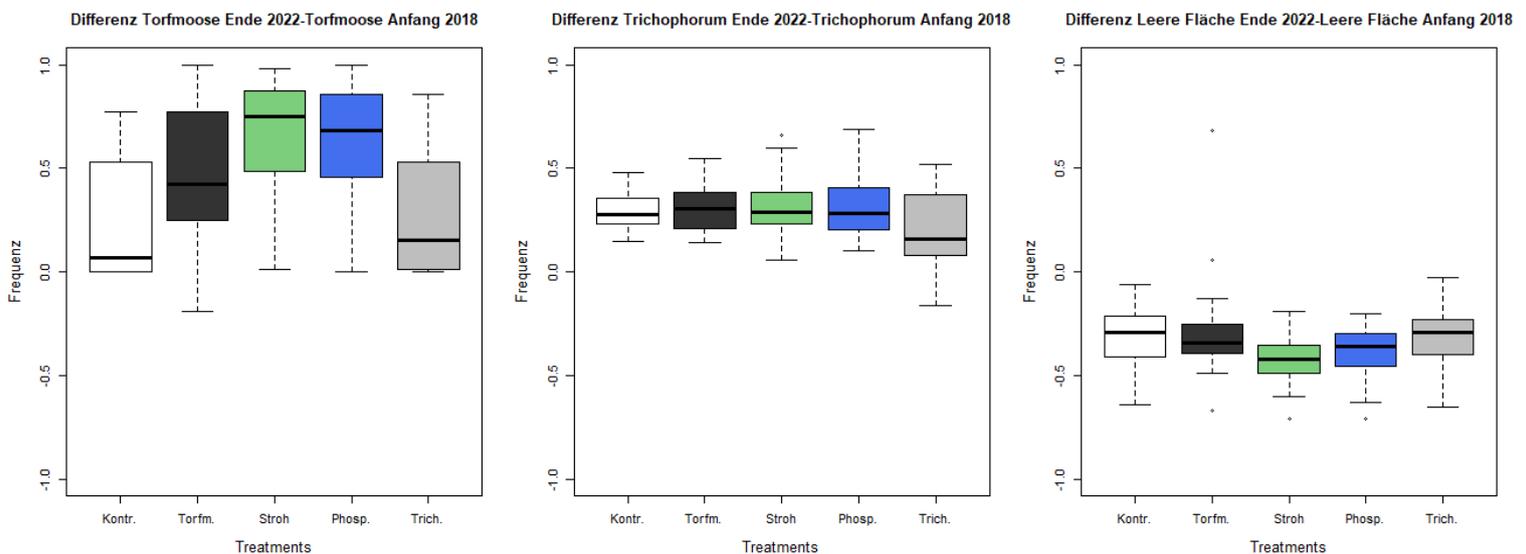


Abbildung 4: Differenz der Frequenz von Torfmoosen (links), *Trichophorum* (Mitte) und Leeren Flächen (rechts) zwischen Anfang 2018 und Ende 2022. Die Linie innerhalb der Box stellt den Median dar und die Box repräsentiert den Abstand zwischen dem 1. und 3. Quantil (25% - 75%). Antennen stellen die Lage der Daten ausserhalb der Quantile dar. Punkte ausserhalb der Antennen sind Ausreisser.

3.2 Torfmoose

Insgesamt zeigt sich eine positive Entwicklung der Frequenz der Torfmoose in allen Versuchsplots. Mit unterschiedlich starkem Wachstum zwischen den Treatments und den Plots. Dabei sind die Treatments „Stroh“ und „Phosphor“ am erfolgreichsten in der Wiederansiedlung von Torfmoosen.

Jedes Treatment, inklusive die Kontrolle (Zunahme Frequenz (F)= 0.23), hat eine höhere Frequenz von Torfmoosen als bei der Vegetationsaufnahme vor Beginn des Experiments im Mai 2018. Der grösste durchschnittlichen Zuwachs wurde mit dem Treatment Stroh (Zunahme Frequenz (F)= 0.66) erzielt, kurz gefolgt vom Treatment Phosphor (Zunahme Frequenz (F)= 0.62). Dabei bestehen signifikante Unterschiede in der Zunahme der Torfmoos-Frequenz vom Treatment „Kontrolle“ zu den Treatments „Torfmoose“ (T-Wert= 2.35, P-Wert= 0.024), „Stroh“ (T-Wert= 4.47, P-Wert < 0.001) und

„Phosphor“ (T-Wert= 3.99, P-Wert < 0.001). Beim Treatment „Trichophorum“ (T-Wert= 0.39, P-Wert= 0.702) wurde hingegen kein signifikanter Unterschied zur Kontrolle festgestellt.

Dies bestätigt das linear gemischt-Effekt Modell. Da Null nicht im 95%-CI von β_0 enthalten ist, besteht ein signifikanter Zusammenhang zwischen der Referenz-Gruppe „Kontrolle“ und der abhängigen Variable „ToE22“. Die Koeffizienten β_2 , β_3 und β_4 enthalten ebenfalls keine Null im 95%-CI. Das bedeutet, die Treatments „Torfmoos“, „Stroh“ und „Phosphor“ führen zu einer signifikant grösseren Wiederansiedlung von Torfmoosen als die Referenz-Gruppe „Kontrolle“. Das Treatment „Trichophorum“ enthält die Null im 95%-CI und zeigt somit keine signifikante Differenz zur Kontrollgruppe. Wie bereits in 2018 besteht bei β_1 kein signifikanter Zusammenhang zwischen der Torfmoos-Frequenz Ende 2022 (ToE22) und der Torfmoos-Frequenz Anfang 2018 (ToA18).

Tabelle 3: Schätzung der Koeffizienten B_i , ihr Standardfehler und das 95%-Vertrauensintervall der Schätzungen. N=100

Koeffizienten	Schätzung	Standardfehler	95%- Vertrauensintervall
β_0 Intercept	0.3394	0.0669	[0.2105, 0.4690]
β_1 sqrt (ToA18)	0.4358	0.2664	[-0.0779, 0.9518]
β_2 Treatment Torfm.	0.2729	0.0723	[0.1339, 0.4118]
β_3 Treatment Stroh	0.4350	0.0724	[0.2959, 0.5743]
β_4 Treatment Phosp.	0.3929	0.0722	[0.2540, 0.5317]
β_5 Treatment Trich.	0.0733	0.0725	[-0.0660, 0.2128]

Eine ausführliche Abbildung der Resultate der durchgeführten Bestandskontrollen zwischen 2018 und 2022 zeigt die Abbildung 5. Dabei wird ersichtlich, dass die durchschnittliche Torfmoos-Frequenz mit jeder Bestandsaufnahme zugenommen hat. Einzig im Jahr 2019 hat die Frequenz der Torfmoose auf den Kontrollflächen abgenommen (Tabelle 4).

Tabelle 4: Frequenz Mittelwert pro Treatment über die Experimentsdauer, grün= durchschnittliche Frequenz höher als im Vorjahr, rot= durchschnittliche Frequenz tiefer als im Vorjahr

Treatment	Torfmoos Anfang 2018	Torfmoos Ende 2018	Torfmoos Ende 2019	Torfmoos Ende 2022
Kontrolle	0.0140	0.0235	0.0190	0.2475
Torfmoos	0.0225	0.2625	0.4170	0.4925
Stroh	0.0075	0.4135	0.5335	0.6655
Phosphor	0.0125	0.3335	0.4345	0.6355
Trichophorum	0.0050	0.1920	0.2225	0.2845

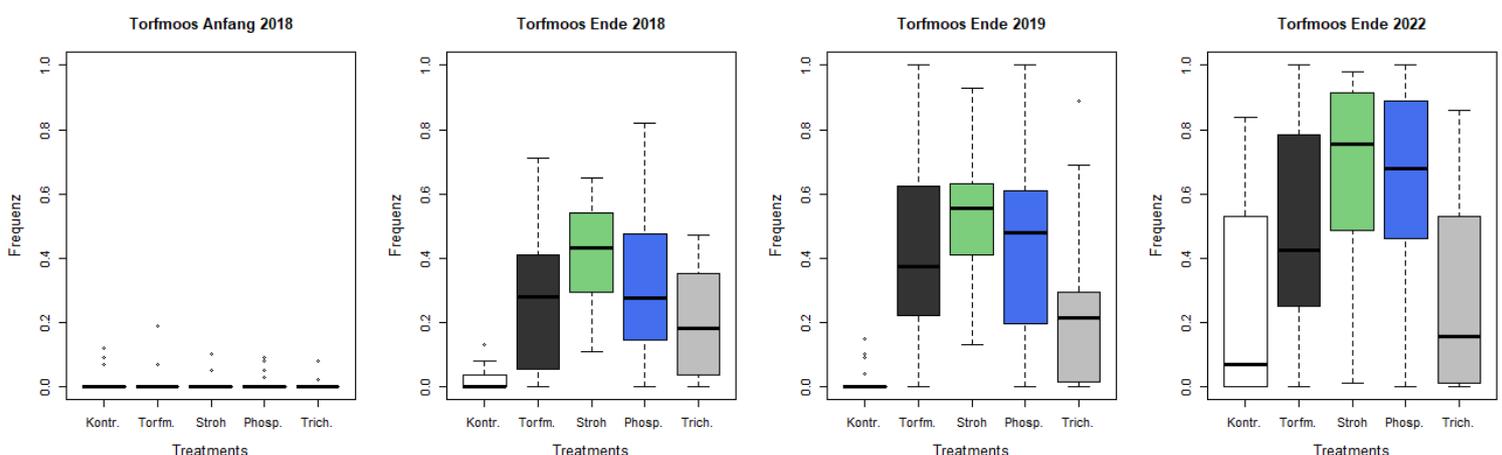


Abbildung 5: Torfmoos-Frequenz pro Treatment der vier Vegetationsaufnahmen

3.3 *Trichophorum cespitosum*

Wie beim Torfmoos, hat auch die Frequenz von *Trichophorum* zugenommen (siehe Abbildung 6). Am grössten ist die Zunahme beim Treatment „Stroh“ mit einer durchschnittlichen Zunahme von $F = 0.32$. Auch die Treatments „Kontrolle“, „Torfmoose“ und „Phosphor“ führten zu einer Frequenzzunahme von $F \approx 0.3$. Klar am kleinsten ist die Zunahme der *Trichophorum*-Frequenz beim

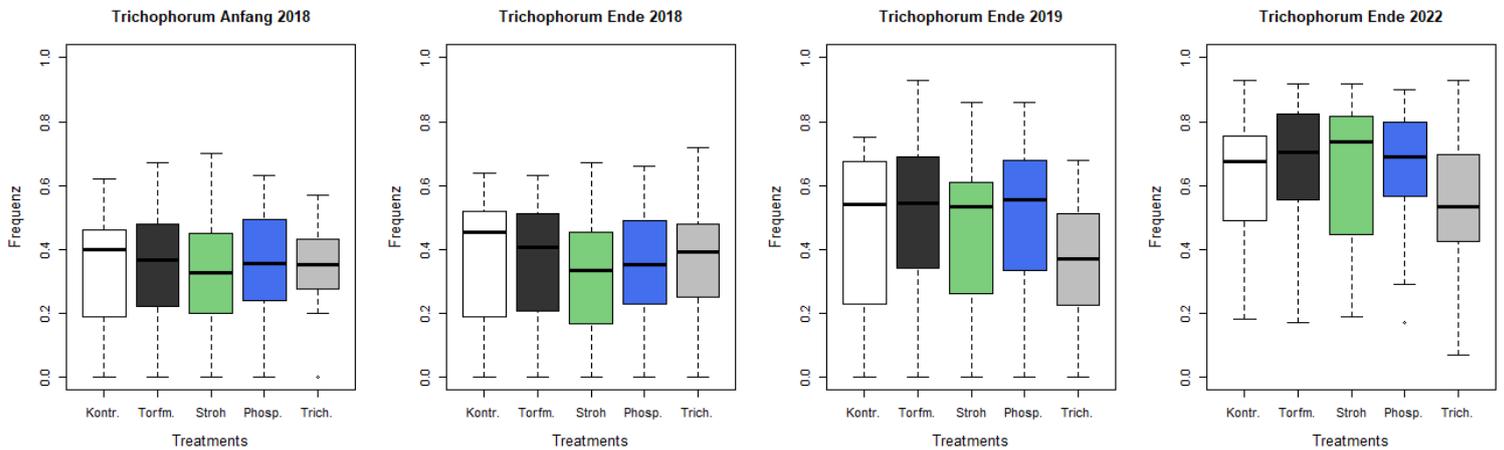


Abbildung 6: *Trichophorum*-Frequenz pro Treatment der vier Vegetationsaufnahmen

Treatment „*Trichophorum*“ mit $F = 0.21$. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf diesen Flächen die *Trichophorum cespitosum* kurzgeschnitten wurden, um die Konkurrenz von Torfmoosen zu minimieren und somit das Wachstum der *Trichophorum cespitosum* gehemmt wurde. Der Unterschied in der Differenz ist jedoch im Vergleich mit den Kontrollflächen nicht signifikant (T-Wert= -1.82, P-Wert= 0.079).

2.5 Vegetationslose Fläche

Klar abgenommen hat die Frequenz der vegetationslosen Fläche. Die Entwicklung der Frequenz kann in der Abbildung 7 beobachtet werden. Die durchschnittlich kleinste Frequenz von vegetationsloser Fläche in 2022 hat das Treatment „Phosphor“ mit einer $F = 0.04$. Die grösste Abnahme von vegetationsloser Fläche weist das Treatment „Stroh“ auf mit einem durchschnittlichen Frequenzrückgang von $F = -0.43$. Das Treatment „Stroh“ zeigt auch als einzige Methode eine signifikante Abweichung (T-Wert= -2.64, P-Wert= 0.01) in der Frequenz von vegetationslosen Flächen zwischen A18 und E22 im Vergleich zur Kontrolle. Die anderen Treatments zeigen keine signifikante Veränderung im Vergleich zur Kontrolle.

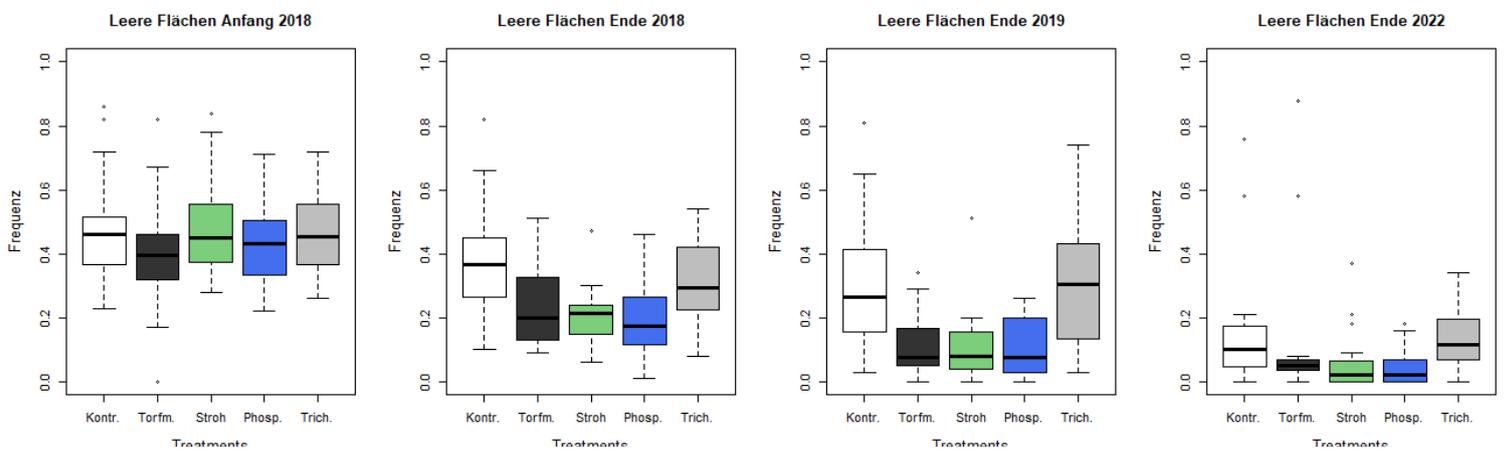


Abbildung 7: Leere Fläche-Frequenz pro Treatment der vier Vegetationsaufnahmen

3.5 Optische Vergleiche

Die oben festgestellten Entwicklungen sind im optischen Vergleich ebenfalls gut zu beobachten: Als Beispiel wurde Plot 2 gewählt (Abbildung 4). Auf allen Flächen in diesem Plot wurden bei der ersten Vegetationsaufnahme 2018 keine Torfmoose beobachtet. Beim Vergleich der Fotos muss beachtet werden, dass aufgrund der nassen Verhältnisse im Mai 2018 und den trockenen Verhältnissen im August 2022 die Bilder generell sehr unterschiedlich aussehen, dazu trägt bei, dass die Aufnahmen in einer anderen Jahreszeit genommen. Insgesamt zeigt sich die Vegetation also in einem sehr unterschiedlichen visuellen Zustand und es ist etwas Abstraktionsvermögen bei der Interpretation nötig.

Generell ist eine Zunahme von Vegetation und eine Abnahme von kahlen Stellen bei allen Treatments zu beobachten. Besonders auffällig ist dies in der Untersuchungsfläche 2c (Treatment Stroh), wo Teilflächen ohne Vegetation in 2018 im 2022 komplett von Torfmoosen überdeckt werden. Auch die Zunahme von *Trichophorum cespitosum* wird ersichtlich z.B. im Plot 2d (Treatment Phosphor), wo die Pflanze sich sichtbar ausgebreitet hat (Abbildung 4).

Die Unterschiede in der Zunahme zwischen den Treatments von Torfmoosen werden mit den Bildern zusätzlich deutlich. Die Kontrollfläche (Untersuchungsfläche 2a) weist auch nach 5 Vegetationsperioden keine Torfmoose auf. Beim Treatment „Torfmoose“ sind Torfmoospflanzen insbesondere in der Mitte der Fläche zu sehen. Noch deutlicher zeigt sich die Ausbreitung der Torfmoose im Treatment „Torfmoose“. Ebenfalls gut sichtbar sind die kleinen grünen Torfmoospflänzchen beim Treatment „Phosphor“. Deutlicher weniger Torfmoose sind beim Treatment „Trichophorum“ zu sehen. Erst bei genauerer Betrachtung fallen die unscheinbaren Torfmoose in der Mitte der Fläche auf (Abbildung 4).



2a Kontrolle



2b Torfmoose



2c Stroh



2d Phosphor



2e Trichophorum

Abbildung 3: Versuchungsflächen 2a-e, Anfang 2018 (links) und Ende 2022 (rechts)

4. Diskussion

4.1 Erfolg der Wiederansiedlung

Das Experiment zeigt deutlich, dass die Wiederansiedlung von Torfmoosen auf krustiger und harter Torfoberfläche durch das Ausstreuen von Torfmoosfragmenten möglich ist. Die Vegetation von Torfmoosen hat über die letzten vier Jahre auf den Untersuchungsflächen stetig zugenommen und sich ausgebreitet. Am erfolgreichsten waren wie in den zwei vorherigen Vegetationskontrollen die Treatments „Stroh“ und „Phosphor“, sie haben im Vergleich zum reinen Ausbringen von Torfmoosen (Treatment „Torfmoos“) zu einer rund 32%, respektive, 26% höheren Deckung von Torfmoosen beim Abschluss des Experiments geführt.

Wie erwartet, ist die Torfmoosfrequenz auf den Kontrollflächen am niedrigsten. Doch die Frequenz von Torfmoosen nahm auch auf diesen Flächen ohne Wiederansiedlungs-Massnahmen zu. Seit der letzten Vegetationsaufnahme in 2019, zeigten die Kontrollflächen sogar die grösste Frequenz-Zunahme. Diese Entwicklung kann durch unterschiedliche Faktoren erklärt werden: Beachtet werden muss, dass sich aufgrund der längeren Dauer des Experiments die Ausbreitung der Torfmoose nicht mehr nur auf die Treatment-Fläche reduzierte. Die Ansiedlung der Torfmoose auf den Kontrollflächen könnte somit auf die Ausbreitung von Torfmoosen anderer Treatments zurückzuführen sein. Dies unter anderem darum, weil bei Starkniederschlägen sicherlich Torfmoosfragmente ausgewaschen und in benachbarte Flächen eingetragen werden. Zusätzlich zeigten die Treatments mit dem Ausbringen von Torfmoosen jeweils zu Beginn des Experiments das höchste Frequenz-Wachstum, vermutlich unter anderem, weil es keine Konkurrenz auf diesen Offenflächen gab. Wenn Torfmoos-Fragmente nun von anderen Treatments auf die Kontrollflächen gelangt sind, so könnte die starke Zunahme der Torfmoose auf den Kontrollflächen im aktuellen Untersuchungszeitraum verglichen werden mit der Zunahme der Torfmoose beim Treatment „Torfmoose“ in 2018, die damals ebenfalls in die vegetationslosen Flächen eingebracht wurden. Auszuschliessen ist das Wachstum aufgrund von günstigeren Wetter-Bedingungen. Der Sommer 2022 war der zweitwärmste Sommer seit Messbeginn in 1864 mit drei Hitzeperioden um massivem Regenmangel während der Vegetationsperiode (MeteoSchweiz, 2022). Da Torfmoose schlecht auf trockenen Oberflächen

wachsen (Chirino, Campeau, & Rochefort, 2006), ist eine Ausbreitung rein aufgrund der klimatischen Bedingungen unwahrscheinlich. Bezogen auf die Klima- und Wetterdaten sei auf ein weiteres, interessantes Phänomen hingewiesen: In den Kontrollflächen konnte zwischen 2018 und 2019 ein Rückgang der Torfmoosfrequenz nachgewiesen werden, während nachher wieder eine Zunahme der Torfmoose stattfand. Dies könnte darauf hinweisen, dass die wenigen Torfmoosfragmente, welche in die Kontrollflächen eingeschwemmt wurden, aufgrund des ebenfalls ausserordentlich trocken-heissen Sommers 2019 teilweise abgestorben sind. Dort, wo sich die Moose bereits in kleine Polster- oder Teppiche entwickeln konnten, also in den Treatments, wo aktiv Torfmoosfragmente ausgebracht wurden, war das nicht der Fall. Dies zeigt auf, dass bei einer flächenhaften Ausbringung von Torfmoosen unbedingt auf eine gewisse Dichte an ausgebrachten Torfmoosfragmenten geachtet werden muss. Eine Orientierung bietet dabei die Menge, die für das Experiment verwendet wurde.

Das Treatment *Trichophorum* erwies sich, wie in den vorhergehenden Kontrollen, als wenig erfolgreich und zeigte keine signifikante Abweichung von den Kontrollflächen. Die Theorie, dass durch die Reduzierung dieser Konkurrenzpflanze, die Torfmoose besser wachsen können und die geschnittenen Halme ähnlich wie Strohhalme fungieren, konnte somit nicht bestätigt werden. Frei (2019) argumentiere, dass die *Trichophorum*-Halme im Gegensatz zu Strohhalmen kein dreidimensionales Netz mit Zwischenräumen bilden konnte und möglicherweise die Lichtzufuhr kritisch reduzierte. Dieser Effekt würde die anfängliche Frequenz erklären. Im Vergleich mit den anderen Treatments fällt aber auf, dass das Wachstum von Torfmoosen in den letzten 2 Jahren am kleinsten ausfällt. Es kann somit im Gegenteil davon ausgegangen werden, dass *Trichophorum* gewisse Vorteile in der Ansiedlung von Torfmoosen aufweist. Vermutlich bieten die Horste „Ankerpunkte“, wo sich die Torfmoose mit ihren Ästchen festhalten können. Sicherlich aber verringern die Horste den Abfluss von Regenwasser, indem sie den Wasserfluss verlangsamen und umleiten. *Trichophorum* als Synergieart für Torfmoosansiedlung: eine weitere interessante Erkenntnis aus dem Projekt.

Das Treatment „Torfmoose“ zeigt insgesamt eine signifikant höhere Wiederansiedlung als die Kontrolle. Auf ca. der Hälfte der Fläche konnten Torfmoose gefunden werden. Dies bestätigt die Annahme, dass sich rein schon das Ausbringen von Torfmoosfragmenten ohne zusätzliche weitere Massnahmen positiv auf die Wiederansiedlung von Torfmoosen auswirkt.

Dieser Effekt kann maximiert werden, indem Stroh-Mulch oder Phosphor zugegeben wird. Phosphor kann in stickstoffreichen Gebieten als limitierender Nährstoff fungieren. Die Zugabe in solchen Gebieten führt zu einer Zunahme der Wiederansiedlung von Torfmoosen (Rien, Bo, & Nils, 1992). Dieser Effekt konnte im ersten Jahr noch nicht festgestellt werden. Doch die Zunahme der Torfmoos-Frequenz über längere Zeit zeigt eine signifikante Zunahme gegenüber der Kontrolle. Nach Léon (2019) zeigt die Zugabe von Phosphor generell kein signifikanter Effekt bei der Regeneration von Torfmoosen, wirkt sich aber signifikant positiv auf das Wachstum von spezifischen Torfmoosen aus. Dies würde erklären, warum im ersten Jahr des Experiments, Phosphor noch nicht seine erwünschte Wirkung erzielte. Es ist möglich, dass es nach der definitiven Ansiedlung der Torfmoosfragmente, bei der eine Selektion der Arten vorausgegangen ist, solche Arten gefördert wurden, welche positiv auf Phosphorzugabe reagieren. Aufgrund der bestehenden hohen Nährstofffrachten aus der Luft (Seitler, Meier, & Ehrenmann, 2021) und der Kontroverse, welche diese Massnahme auslösen könnte, sollte aber vom Ausbringen von Phosphor in diesen von Nährstoffmangel geprägten Ökosystemen abgesehen werden.

Wie bereits von Frei (2019) und Cramer (2019) dokumentiert, kann Stroh durch seine Struktur zu einer Reduktion der Temperatur unterhalb dem Stroh-Mulch führen und kann die Bodenfeuchtigkeit erhöhen. Diese Eigenschaften führen dazu, dass dieses Treatment nach vier Jahren auf den

Untersuchungsflächen zur grössten durchschnittlichen Torfmoos-Frequenz geführt hat. Die Frequenz der Torfmoose lag in den Stroh-Flächen rund 30% höher, als in den reinen Torfmoos-Flächen. Wie in den vergangenen zwei Vegetationskontrollen, empfiehlt sich dieses Treatment also am stärksten für die Wiederansiedlung von Torfmoosen. Mit dieser Massnahme ist jedoch ein Eintrag von Moor-fremdem Material in das Moorobjekt verbunden, was weitere Stoffe ins Ökosystem einbringen kann. Zusätzlich muss das Material vermutlich per Helikopter vor Ort transportiert werden, während die Torfmoose aus der Umgebung gewonnen werden können. Es ist fraglich, ob bei einer Ansiedlung mittels Stroh-Mulch Kosten und Nutzen in einem guten Verhältnis stehen.

4.2 Validität

Die Frequenzbestimmung wurde von drei unterschiedlichen Personen bei recht unterschiedlichen Klima-/Wetterbedingungen aufgenommen. Diese Aufnahmen unterliegen somit einem Observer-Bias. Es ist aber davon auszugehen, dass aufgrund der jeweils identisch angewandten Methodik, welche sehr einfach und transparent ist, dieser Fehler minimal ist.

5. Folgerungen

Aufgrund der in diesem 5-jährigen Projekt erzielten Resultate können folgende Folgerungen und Empfehlungen für die Revitalisierung von stark erodierten, voralpinen Hochmooren gemacht werden:

- Für die Revitalisierung des hydrologisch zentralen Acrotelms der degradierten Hochmoore bietet sich eine Ansiedlung von Torfmoosen an. Die Flächen werden nach Ausstreuen von Torfmoosen innerhalb von wenigen Jahren wiederbesiedelt.
- Die Torfmoose können in der Umgebung des Moorobjektes gewonnen werden, damit die genetische Basis für das Gebiet passend ist. Es ist darauf zu achten, eine Mischung verschiedener Torfmoos-Fragmente auszubringen, damit sich die am besten angepassten Arten durchsetzen können.
- Für eine möglichst schnelle und effiziente Ansiedlung von Torfmoosen kann zusammen mit den Torfmoosfragmenten Stroh-Mulch ausgebracht werden. Dies steigert die Ansiedlungsrate um etwa 30%. Allerdings wird damit Moor-fremdes und allenfalls chemisch belastetes Material in das Moor eingebracht. Eine Ansiedlung und Ausbildung eines Acrotelms ohne Stroh-Mulch dauert vermutlich einige Jahre länger.
- Insgesamt muss bis zu einer Wiederherstellung des Acrotelms in diesen Gebieten, die eine kurze Vegetationsperiode und eher wenig wüchsigen Bedingungen aufweisen, vermutlich mit einem Zeithorizont von Jahrzehnten gerechnet werden.

6. Quellen

- Aerts, Rien, Bo Wallèn, Nils Malmer, & Hannie De Caluwe. (2001). Nutritional Constraints on Sphagnum-Growth and Potential Decay in Northern Peatlands. *Journal of Ecology*, 89(2), S. 292-99.
- Chirino, C., Campeau, S., & Rochefort, L. (2006). Sphagnum establishment on bare peat: The importance of climatic variability and Sphagnum species richness. *Applied Vegetation Science*, S. 285-294.
- Cramer, N. (2019). *Untersuchung zur Wiederansiedlung von Torfmoosen im Hochmoor «Zwischen Glaubenberg und Rossalp»*. BSc Arbeit, ETH Zürich.
- Frei, S. (2019). *Experimenteller Ansatz zur Wiederansiedlung von Torfmoosen im Hochmoor «Zwischen Glaubenberg und Rossalp»*. BSc Arbeit, ETH Zürich.
- Holden, J., Wallage, Z., Lane, S., & McDonald, A. (2011). Water Table Dynamics in Undisturbed, Drained and Restored Blanket Peat. *Journal of Hydrology*, 402(1-2), S. 103-14.
- Klaus. (2007). *Zustand und Entwicklung der Moore in der Schweiz. Ergebnisse der Erfolgskontrolle Moorschutz*. Umwelt-Zustand Nr. 0730, Bundesamt für Umwelt, Bern.
- Léon, C., Neila-Pivet, M., & Benitez-Mora, A. (2019). Effect of phosphorus and nitrogen on Sphagnum regeneration and growth: an experience from Patagonia. *Wetlands Ecol Manage*, S. 257–266. Von <https://doi.org/10.1007/s11273-019-09657-4> abgerufen
- MeteoSchweiz. (2022). *Klimabulletin Sommer 2022*. Zürich.
- Rien, A., Bo, W., & Nils, M. (March 1992). Growth-Limiting Nutrients in Sphagnum-Dominated Bogs Subject to Low and High Atmospheric Nitrogen Supply. (B. E. Society, Hrsg.) *Journal of Ecology*(1), S. 131-140 . Von <https://www.jstor.org/stable/2261070> abgerufen
- Seitler, E., Meier, M., & Ehrenmann, Z. (2021). *Atmosphärische Stickstoff-Deposition in der Schweiz 2000 bis 2019*. Rapperswil: FUB - Forschungsstelle für Umweltbeobachtung .
- Staubli, P. (2012). *Moor-Regeneration: Zwischen Glaubenberg und Rossalp Gemeinden Entlebuch LU/ Sarnen OW: Kurzbericht Dezember 2012*.