

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



UNESCO BIOSPHÄRE
ENTLEBUCH
LUZERN SCHWEIZ

Abschätzung des CO₂-Speichers der Hochmoore in der UNESCO Biosphäre Entlebuch

Mike P. Dettwiler

Bachelorarbeit des Studiengangs Umweltnaturwissenschaften

Betreuung: Florian Knaus, ETH Zürich und Lena Gubler, WSL Birmensdorf

Abgabe: Februar 2019



Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde der CO₂-Speicher der Hochmoore in der UNESCO Biosphäre Entlebuch ermittelt. Das Biosphärenreservat liegt südwestlich von Luzern und besitzt schweizweit eine der höchsten Dichten an Hochmooren. Diese Lebensräume haben ein saures Milieu und sind sehr nährstoffarm. Sie gelten daher für Flora und Fauna als extreme Standorte. So hat sich eine spezialisierte und seltene Tier- und Pflanzenwelt entwickelt. Die Artenvielfalt ist allerdings nicht der einzige Schutzwert dieser Lebensräume. In den Moorböden sind grosse Mengen an organischem Kohlenstoff gespeichert. Die Speicherung erfolgt durch die Bildung von Torf, der sich in den Mooren ablagert. Langfristig werden so grosse Mengen CO₂ aus der Atmosphäre in den Moorböden gebunden. Die Akkumulation von Torf ist jedoch nur in einem ungestörten und naturnahen Moor möglich. Wird das Moor durch menschliche Aktivitäten negativ beeinträchtigt, beispielsweise durch Entwässerung, gelangt Sauerstoff in den Torf und setzt den mikrobiellen Abbau in Gang. Auf diese Weise entweicht der organische Kohlenstoff in Form von CO₂ in die Atmosphäre. Entwässerte Moore sind infolgedessen CO₂-Quellen und verdienen eine besondere Beachtung in Klimadebatten.

Gemäss einer Beurteilung der UNESCO Biosphäre Entlebuch aus dem Jahr 2009 sind die meisten Hochmoore in einem gestörten, schlechten Zustand. Es ist daher anzunehmen, dass sich der CO₂-Speicher verringert. Das vorliegende Resultat ist ein Speicher von 628 bis 699 Kilotonnen CO₂-Äquivalente und wie ermittelt wurde, findet tatsächlich ein Verlust des Torfs statt. Durch den momentanen Torfverlust, bedingt durch die anhaltende Mineralisierung, entstehen, mit Einbezug der fehlenden Senke, jährliche Emissionen zwischen 761 und 1'688 Tonnen CO₂. Zum Vergleich: ein Flug von Zürich nach New York belastet die Umwelt bereits mit 1,2 Tonnen pro Passagier. In Torfmenge ausgedrückt beruht der Verlust auf 257 bis 738 Tonnen pro Jahr. Wären alle Hochmoore in einem stark gestörten Zustand, würden sogar zwischen 2'403 und 4'617 Tonnen CO₂ emittiert werden. In einem ausnahmslos naturnahen Zustand würden die Hochmoore hingegen 242 bis 311 Tonnen CO₂ pro Jahr aufnehmen und speichern. Je nach Zustand fungieren sie daher als CO₂-Quelle oder -Senke. Eine Renaturierung aller gestörten Hochmoore wäre somit ein idealer Ansatz für die UNESCO Biosphäre Entlebuch, um die Reduktion der steigenden Treibhausgas-Emissionen zu unterstützen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	UNESCO Biosphäre Entlebuch.....	8
3	Das Hochmoor.....	10
3.1	Aufbau.....	10
3.2	Entstehung.....	12
3.3	Torfbildung und -abbau	12
3.4	Funktionen und Schutzwert	14
4	Methodik.....	17
4.1	Kategorisierung der Hochmoore.....	18
4.2	Feldarbeit: Messung der Mächtigkeit	20
4.3	Abschätzung des CO ₂ -Speichers.....	21
4.4	Abschätzung der Veränderung.....	22
5	Ergebnisse.....	24
5.1	Feldarbeit und Mittelwerte.....	24
5.2	CO ₂ -Speicher	25
5.3	Veränderung des CO ₂ -Speichers.....	26
6	Diskussion	28
6.1	Fehlerquellen und Methodenkritik.....	29
7	Schlussfolgerung	32
	Literaturverzeichnis.....	34
	Anhang	37
	Eigenständigkeitserklärung	45

1 Einleitung

Von nutzloser Restfläche zum streng geschützten Lebensraum: Die Bedeutung der Moore hat sich in der Schweiz in den letzten 200 Jahren gänzlich verändert. Kein anderer Lebensraum wurde in dieser Zeit derart dezimiert und geniesst mittlerweile einen solchen rigorosen Schutz (BUWAL, 2002). Bis dieser Schutz jedoch wirkte, war die Zerstörung bereits weit fortgeschritten. In den vergangenen 200 Jahren wurden bis zu 90% der Moore zerstört. Mit rund 190 Quadratkilometern, 0,5% der Landesfläche der Schweiz, verbleiben nur noch wenige der ursprünglichen Moorflächen (BAFU, 2018).

Früher bedeckten Moore weite Teile des Mittellands und bestimmten massgeblich das Landschaftsbild. Im 17. Jahrhundert, als nach jahrhundertelanger Abholzung der Wälder Brennholzangel herrschte, gewannen die Torflager der Moore als Energieressourcen erstmals an Bedeutung. So begann man, wie es in moorreichen Gebieten im Norden Europas schon länger der Fall war, auch in der Schweiz die Torflager der Moore auszubeuten. In Notzeiten wurde der Abbau jeweils intensiviert. Zuletzt wurden in der Schweiz während des Zweiten Weltkriegs 2,5 Millionen Tonnen Torf verbrannt. Dies entspricht rund zwei Dritteln der heute noch verbleibenden geschätzten Hochmoorvolumina (BUWAL, 2002). Ebenfalls zum Rückgang der Moore haben die grossen Meliorationen im 19. Jahrhundert beigetragen. In grossen Meliorationswerken wurden Flüsse kanalisiert und Moorflächen trockengelegt. So wurden bei der Juragewässerkorrektion im Seeland zwischen 1869 und 1888 rund 400 Quadratkilometer Moorfläche in Kulturland umgewandelt. Dasselbe geschah bei der Linthebene-Melioration und entlang vieler weiterer Flüsse. Im Standardwerk «Die Moore der Schweiz», das 1904 von den ETH-Professoren J. Früh und C. Schröter publiziert wurde, sind 5'464 Moore aufgelistet. Schon damals existierten 3'381 davon nur noch als Flurnamen. Dieser Verlust der Moore im 18. und 19. Jahrhundert gilt als grösste Veränderung des Landschaftsbildes seit der weitgehenden Abholzung der Schweizer Wälder (BUWAL, 2002). Die zunehmende Zersiedlung im 20. Jahrhundert hat die Reduzierung der Moorflächen weiter vorangetrieben (Thut, 2010).

Erste Bestrebungen, Moore zu schützen, gab es bereits im Jahr 1909, als die Naturschutzkommission der Naturforschenden Gesellschaft Bern die Trockenlegung der beiden Hochmoore im Niederlindach- und Löhr-Wald verhindern wollte. Trotz Versprechen des Regierungsrats geschah die Unterschutzstellung damals nicht. Ein Abzugskanal verursachte eine Senkung des Wasserspiegels von 60 Zentimeter. Proteste und Kundgebung über den wissenschaftlichen Wert der Hochmoore seitens des Botanikers H. Gilomen im Jahr 1934

fürten aber schliesslich zum Erfolg. Der Berner Regierungsrat erklärte das Lörmoos 1937 zum Naturschutzgebiet. Weitere einzelne Moorobjekte wurden in den 1960er- und 1970er-Jahren unter Schutz gestellt. Fortführende Zerstörungen wurden damit jedoch nur in kleinem Rahmen verhindert. Bundesweiter Schutz wurde schliesslich mit der «Rothenthurm-Initiative» im Jahr 1987 erlangt. Auf diese Weise wurden fortan alle Moore von nationaler Bedeutung durch die Verfassung geschützt. Die Initiative war eine Reaktion auf die Planung eines Waffenplatzes des Schweizer Militärs auf der Moorebene von Rothenthurm. Lanciert wurde sie 1983 vom WWF und dem Schweizerischen Bund für Naturschutz (SBN, heute Pro Natura). Seither ist die Fläche der Moore in der Schweiz stabil geblieben (BUWAL, 2002). Allerdings sind die Zustände vieler Moore schlecht bis sehr schlecht. Sie sind von Austrocknung, Verbuschung und Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft und der Luft bedroht (Klaus, 2007). Die verbleibenden Moorflächen benötigen daher aktive Schutzmassnahmen und eine angepasste Nutzung und Pflege (BUWAL, 2002).

Die Folgen der bisherigen Zerstörungen der Moore sind denjenigen der Abholzung nicht unähnlich. Dank dem enormen Wasserspeichervermögen der Torfmoose, fungieren naturnahe Moore als Wasserspeicher und helfen Hochwasserabflüsse abzuschwächen. In einer Landschaft, mit ausschliesslich drainierten Mooren, erhöht sich durch das reduzierte Wasserrückhaltevermögen das Risiko von Überschwemmungen erheblich. Des Weiteren dienen die Moore als Lebensraum für eine Vielzahl von Lebewesen. Die Drainage und die Nutzung dieser Biotop hat zu einer bedrohlichen Abnahme der moortypischen Artenvielfalt geführt. Viele Tier- und Pflanzenarten auf der «Roten Liste» sind auf die Moore als Lebensraum angewiesen (BUWAL, 2002). Zudem sind in den Moorböden gewaltige Mengen an organischem Kohlenstoff gespeichert. Die weiträumige Zerstörung der Moorböden haben zu einer Freisetzung grosser Mengen CO₂ und N₂O in die Atmosphäre geführt (Läubli, 2018). Aber auch wenn mittlerweile die direkte Zerstörung durch den Menschen in der Schweiz gestoppt ist, sind die Moore nicht automatisch von der Zerstörung verschont. Alte Drainagen, zunehmende Trockenheit und Nährstoffeinträge aus der naheliegenden Landwirtschaft sowie aus der Luft stören die sensiblen Ökosysteme nach wie vor. Die Störungen hemmen die Torfbildung und ermöglichen den mikrobiellen Abbau des Torfs. Dieser Prozess setzt Treibhausgase frei und macht die Moore zu einer CO₂-Quelle. In einem natürlichen und ungestörten Zustand hingegen entsteht Torf, wobei CO₂ aus der Atmosphäre gebunden und gespeichert wird. So stellen Moore je nach Zustand entweder eine CO₂-Quelle oder eine CO₂-Senke dar. Sie sind damit auf zweifache Weise in der Klimadebatte von Bedeutung und ein idealer Ansatzpunkt für die Verminderung von Treibhausgasen und der Bekämpfung der aktuell

drohenden Klimaveränderungen (Trepel, 2007). Das genaue Ausmass der Emissionen aus den Mooren ist allerdings noch wenig erforscht und fehlt in einigen Treibhausgasbilanzen. Gemäss dem Pariser Klimaabkommen im Jahr 2015 sollen jedoch alle Vertragsstaaten, darunter auch die Schweiz, ab 2020 diese Lücke in ihren jeweiligen nationalen Treibhausgasbilanzen füllen (Läubli, 2018). In der Schweiz ist dies bereits der Fall. Alle Hochmoore von nationaler Bedeutung und ausreichender Grösse befinden sich im Treibhausgasinventar. Die Bilanz ist allerdings noch ungenau, denn die Hochmoore werden nicht zwischen naturnah, renaturiert oder gestört unterschieden. Eine Datenbank mit dieser Unterscheidung fehlt bis heute (Lena Gubler, schriftlich).

In der vorliegenden Arbeit wurde die Grösse des CO₂-Speichers der Hochmoore für eine Beispielregion der Schweiz, die moorreiche UNESCO Biosphäre Entlebuch, abgeschätzt. Das Ziel war es, aufzuzeigen, wie viel Kohlenstoff in den Moorböden gespeichert ist und demzufolge wie viele Tonnen CO₂-Äquivalente aufgrund des aktuell gestörten Zustandes, in welchem sich die Moore befinden, in die Atmosphäre freigesetzt werden könnten. Gemäss einer Beurteilung aus dem Jahr 2009 befindet sich nämlich die Mehrheit der Hochmoore in einem schlechten Zustand (Knaus, 2009). Der Perimeter der untersuchten Hochmoore umfasst die UNESCO Biosphäre Entlebuch im Südwesten des Kantons Luzerns. Diese besteht aus sieben Gemeinden mit einer Gesamtfläche von knapp 40'000 Hektaren. Die Region, vor allem bei Sörenberg im südwestlichen Teil, ist bekannt für ihre vielen noch verbleibenden Hochmoore von nationaler Bedeutung. Gemäss dem Bundesinventar der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung befinden sich dort 45 Hochmoorobjekte mit einer Fläche von 173 Hektaren. Im Rahmen einer Feldarbeit wurden einige dieser Hochmoore für eine Stichprobe aufgesucht und deren aktuelle Torfmächtigkeit gemessen. Mit Mittelwerten wurden die Resultate auf die nicht untersuchten Hochmoore extrapoliert und mit der Fläche multipliziert, um das Torfvolumen zu erhalten. Das Torfvolumen wurde wiederum in CO₂-Äquivalente umgerechnet. Das Resultat ist die Quantifizierung des CO₂-Speichers der Hochmoore in der Biosphäre Entlebuch. Anhand der Zustände der Hochmoore wurden anschliessend die aktuellen und in zwei Szenarien die möglichen CO₂-Emissionen ermittelt. Der Unterschied der Emissionswerte in Abhängigkeit der Zustände soll die Notwendigkeit des Schutzes und der Renaturierungen verdeutlichen.

2 UNESCO Biosphäre Entlebuch

Die Region Entlebuch liegt im südwestlichen Teil des Kantons Luzern und bildet das ca. 400 Quadratkilometer grosse Haupttal der Kleinen Emme. Sie beheimatet insgesamt 17'000 Einwohner und setzt sich aus acht Gemeinden zusammen; Romoos, Doppelschwand, Entlebuch, Hasle, Schüpfheim, Escholzmatt-Marbach, Flühli und Sörenberg. Die Landschaft weist einen ausgeprägten ländlichen Charakter auf und umfasst überwiegend Wald und landwirtschaftliche Flächen. Was das Entlebuch aber besonders macht, ist die interessante Karstlandschaft Schratzenfluh und die hohe Anzahl an Mooren. Mit 135 Flach- und Hochmooren, sowie vier Moorlandschaften von nationaler Bedeutung, beherbergt die Region eine der höchsten Dichten an Mooren in der Schweiz. Mit zusätzlich mehreren Auenlandschaften, Amphibienlaichgebieten und Trockenwiesen sind insgesamt 50% der gesamten Fläche der Region unter Schutz gestellt. Seit 2001 ist die Region zudem neben dem Schweizer Nationalpark das zweite UNESCO Biosphärenreservat der Schweiz (UNESCO Biosphäre Entlebuch, 2018).

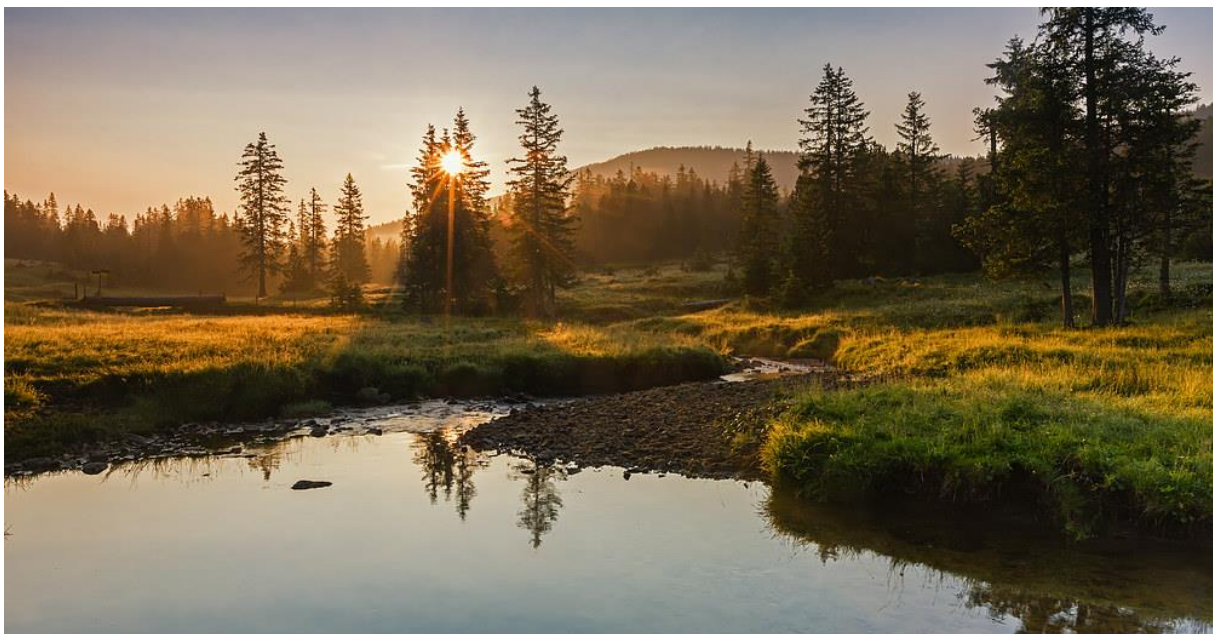


Abbildung 1: Landschaft in der Biosphäre (Quelle: Bergfex)

Grundstein für die Entstehung der UNESCO Biosphäre Entlebuch (UBE) legte die Annahme der «Rothenurm Initiative» zum Schutz der Moore im Jahr 1987. Diese wurde damals schweizweit mit 57,8% Ja-Stimmen angenommen. In der Region Entlebuch gab es bei der Umsetzung, also der Unterschutzstellung der Moore anfänglich massiven Widerstand. Der Schutz der Moore wurde als Entwicklungshemmnis betrachtet, weil dies die landwirtschaftlichen Tätigkeiten beschränken würde. In vielen Diskussionen mit den Betroffenen konnte man sich aber einigen, dass Moorlandschaften auch eine

Entwicklungschance darstellen. Daraufhin brachte der Regionalplaner W. Büchi das Modell «Biosphärenreservat» als Label ins Spiel. Auf diese Weise sollte es möglich sein, die Natur zu schützen und zur selben Zeit die Wirtschaft zu fördern. Das Vorhaben wurde schliesslich durch eine Volksabstimmung angenommen. Weltweit war dies das erste Biosphärenreservat, das auf diese Weise entstanden ist. Der offizielle Betrieb begann 2001 und im gleichen Jahr erteilte die UNESCO die Anerkennung als erstes Biosphärenreservat der Schweiz nach Sevilla-Kriterien. 2008 folgte durch das Bundesamt für Umwelt (BAFU) die Anerkennung als erster Naturpark von nationaler Bedeutung (UNESCO Biosphäre Entlebuch, 2018).

Gemäss Vorgaben der UNESCO muss ein Biosphärenreservat eine Zonierung aufweisen. Diese erfolgt anhand von naturräumlichen Voraussetzungen und Intensität von menschlichen Aktivitäten. Sie ist unterteilt in Kern-, Pflege-, und Entwicklungszonen. Die Kernzone besteht hauptsächlich aus Mooren, Moorwäldern, Jagdbanngebieten und der markanten Karstlandschaft Schratzenfluh (Abbildung 2). Hier sind prinzipiell nur nachhaltige und schonende Pflegeeingriffe möglich. Mit 8% der Fläche erfüllt das Entlebuch die Vorgabe von 5%. In der Pflegezone wird Natur und Kultur gleich stark gewichtet, darum sind in dieser Zone bewirtschaftete Flächen wie Wiesen und Weiden enthalten. Mit 42% der Fläche ist die Mindestvorgabe von 10% hervorragend erfüllt. In der Entwicklungszone steht der Mensch im Zentrum. Sie macht im Entlebuch rund 50% der Fläche aus. Hier sollen sich die sozialen, wirtschaftlichen und kulturellen Ansprüche der Menschen entwickeln können (UNESCO Biosphäre Entlebuch, 2018).

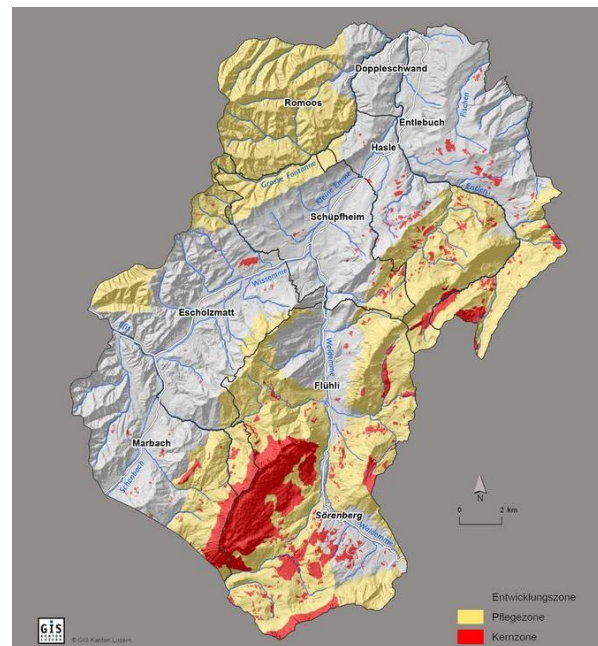


Abbildung 2: Zonierung in der UBE (Quelle: UBE)

Das Projekt hat sich als erfolgreich erwiesen, denn gemäss einer Überprüfung zehn Jahre nach Inbetriebnahme durch die UNESCO, wurde die UBE mit Modellcharakter ausgezeichnet. Das Biosphärenreservat leistet einen wertvollen Beitrag an die Nachhaltigkeitsziele der Vereinten Nationen. Die vielfältige Natur und Kultur wird erhalten, die Regionalwirtschaft gestärkt und die Region zeigt sich als ein international anerkanntes Kompetenzzentrum für nachhaltige Regionalentwicklung (UNESCO Biosphäre Entlebuch, 2018).

3 Das Hochmoor

Ein Moor ist eine permanent mit Wasser gesättigte und torfbildende Landschaftseinheit. Der ständige Wasserüberschuss hält den Boden sauerstoffarm und verhindert den Abbau der organischen Substanz, die sich in Form von Torf im Boden ablagert. Generell werden Moore durch ihre unterschiedliche Wasserspeisung in Hoch- und Flachmoore eingeteilt. **Hochmoore** werden ausschliesslich aus Niederschlagswasser gespeist und das mineralhaltige Grundwasser befindet sich tief unter dem Wurzelraum. Die chemische Zusammensetzung des Wassers in einem Hochmoor ist aus diesen Gründen nährstoffarm und sauer. Sie gelten daher als extreme Standorte für Flora und Fauna. **Flachmoore** beziehen ihr Wasser aus dem Grund- oder Oberflächenwasser. Deren chemische Beschaffenheit kann je nach anströmendem Wasser variieren (Trepel, 2007). Ferner gibt es noch weitere Kategorien, wie z.B. die **Übergangsmoore**, die als Zwischenstufe auftreten. In dieser Arbeit werden allerdings ausschliesslich die Hochmoore im Entlebuch behandelt. Die folgenden Kapitel beziehen sich daher vornehmlich - aber nicht ausschliesslich - auf die Eigenschaften der Hochmoore.

3.1 Aufbau

Der Aufbau eines Moores besteht aus zwei Schichten; das Akro- und das Katotelm¹ (Abbildung 3). Das **Akrotelm** ist die obere und lebende Vegetationsschicht. Sie ist nicht dauerhaft mit Regenwasser gesättigt und der Wasserspiegel fluktuiert je nach Niederschlagsmenge. Unter diesen Voraussetzungen können Pflanzen gewohnt Photosynthese betreiben und wachsen. Das **Katotelm**, der eigentliche Torfkörper, ist die untere und tote Schicht. Hier herrscht Sauerstoffmangel, da diese Schicht permanent mit Wasser gesättigt ist. Aus diesem Grund fehlen Bakterien, Würmer und andere abbauende Organismen weitgehend. Die abgestorbene Moorvegetation wird unter diesen Bedingungen nur sehr langsam zersetzt und als Torf akkumuliert (Knaus, 2018).

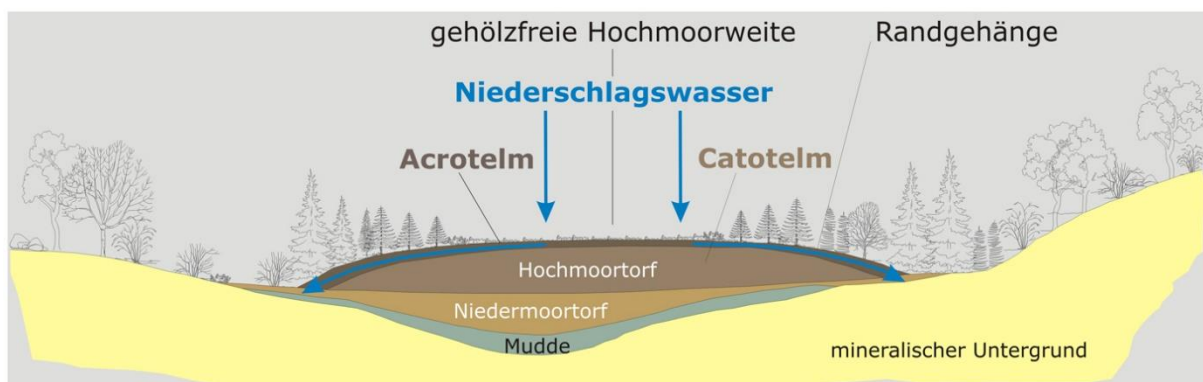


Abbildung 3: Schematischer Querschnitt eines Hochmoors (Quelle: Moorverein Wolfgangsee)

¹ «Akrotelm» (griech.: akros = höchst; telma = Sumpf) und «Katotelm» (griech.: kato = unten)

Ein Hochmoor hat grundsätzlich die Form einer Linse und ist über die Umgebung aufgewölbt. Die Torfmoose im Akrotelm wachsen in die Höhe, während der abgestorbene Teil im Katotelm verrotft und abgelagert wird. Auf der Oberfläche bilden **Bulten-Schlenken-Komplexe** heterogene Kleinlebensräume (Abbildung 4). Die Bulten sind mit Torfmoosen bedeckte Torfhügel, die zeitweise austrocknen können. Nicht selten findet man darum in gestörten Hochmooren einen kleinen Baum auf einer Bulte. Die Schlenken sind die Vertiefungen dazwischen und dauernd nass. An den leicht entwässerten Randlagen des Hochmoores kann ein lichter Moorwald aus Fichten, Birken oder Föhren auftreten (BUWAL, 2002).

Durch menschliche Einflüsse kann sich dieses natürliche Abbild eines Hochmoors verändern: Kanäle für die Entwässerung (Drainagen) können zur Senkung des Wasserspiegels führen. Die entleerten Poren des Torfkörpers kollabieren und das Hochmoor sackt ab. Infolge der Drainage gelangt Sauerstoff in den Torfkörper und setzt den natürlichen Abbau in Gang. Durch die Mineralisierung der organischen Substanzen werden Nährstoffe freigesetzt und nährstoffbedürftige Pflanzen können sich ansiedeln. Diese verdrängen die typische Hochmoorvegetation und wandeln das Hochmoor langsam in eine Heide um. Dieser Prozess lässt sich unter geeigneten Bedingungen durch erneute Vernässung wieder umkehren (BUWAL, 2002).



Abbildung 4: Bulten-Schlenken-Komplex (Quelle: K. Kessler)



Abbildung 5: Farbige Torfmoose (Quelle: T. Hardt)

Die Hochmoorvegetation besteht überwiegend aus **Torfmoosen**, auch Sphagnen genannt. Im sonst relativ einheitlich grünen Stamm der Moose, bilden Sphagnen eine sehr farbenfrohe Gruppe (Abbildung 5). In der Schweiz existieren rund 30 Arten, wovon 12 nur in Hochmooren vorkommen. Die grösste Vielfalt findet man in der Region der mittleren Nordalpen, wo sich die Biosphäre Entlebuch befindet (BUWAL, 2002). Die Torfmoose sind die Folge und Ursache des hohen Wassergehalts in Mooren. Im Gegensatz zu anderen Pflanzen besitzen sie keine Gefässe, sondern Kapillarsysteme ausserhalb des Stämmchens und spezielle Zellen in den Blättchen zur Wasserspeicherung. Durch diesen Aufbau können Torfmoose grosse Mengen an

Wasser speichern. Zu Zeiten der Trockenheit können sie ihren Stoffwechsel auf ein Minimum reduzieren, während sie bei Niederschlägen wie ein Quellkörper das 30-fache ihrer Trockenmasse an Wasser aufnehmen können. Torfmoose sind daher entscheidend für die Entstehung von Hochmooren. Ausserdem sind sie bestens an die extremen Bedingungen dieser Standorte angepasst. Sie besitzen die Fähigkeit Wasserstoff-Ionen abzugeben, um selbst in geringen Konzentrationen vorhandene Nährstoffe aufzunehmen. Die Abgabe von Wasserstoff-Ionen fördert zudem das saure Milieu, das das Wachstum von Konkurrenten erschwert (Aktion Moorschutz, 2018). Beschränkt durch die Nässe und nährstoffarme Umgebung können in den zentralen Flächen der Hochmoore auch grundsätzlich keine Bäume wachsen. In der mitteleuropäischen Urlandschaft, die flächendeckend bis zur Baumgrenze bewaldet war, gehörten Hochmoore zu den wenigen offenen Flächen (BUWAL, 2002).

3.2 Entstehung

Die Entstehung eines Hochmoors ist ein langsamer Prozess. Dieser kann auch bei günstigen und ungestörten Bedingungen Jahrtausende dauern. Voraussetzung ist ein niederschlagreiches und feucht-kühles Klima, das die Bildung von Torf fördert, bzw. dessen Zersetzung hemmt (siehe Kapitel 3.3). Zudem ist die Topografie entscheidend. Das Gelände muss möglichst eben und der geologische Untergrund undurchlässig sein, damit der Boden ausreichend nass bleibt und das Regenwasser nicht sofort wieder abfließt. Gleichzeitig darf kein Grundwasser an die Hochmooroberfläche durchdringen, um den Eintrag von Nährstoffen zu verhindern (Grünig, 1986). Nicht selten liegt der Ursprung eines Hochmoors in einem stehenden Gewässer, das sich mit unvollständig zersetztem Material aus Wasserpflanzen langsam füllt und verlandet. Dabei entsteht zuerst ein typisches Flachmoor. Das Endstadium dieses Verlandungsprozesses bildet häufig ein Bruchwald, aber unter günstigen klimatischen und topografischen Bedingungen wächst die Torfschicht weiter. Durch das Wachstum nach oben verliert die obere Schicht den Kontakt zum Grundwasser und über die Zwischenstufe des Übergangsmoors entwickelt sich ein Hochmoor (BUWAL, 2002). Viele solcher Hochmoore mit mächtigem Torfkörper sind nach dem Ende der letzten Eiszeit vor 10'000 Jahren entstanden. Die zurückweichenden Gletscher hinterliessen Becken, die mit einer wasserundurchlässigen Tonschicht abgedichtet wurden. Das war eine ideale Voraussetzung für die Entwicklung von Mooren (BAFU, 2018).

3.3 Torfbildung und -abbau

Das Gefüge von **Torf** ist allgemein braun und faserig. Die Zusammensetzung kann je nach vorherrschenden Moorvegetation leicht variieren. Gemäss der deutschen bodenkundlichen Definition wird das Bodensubstrat als Torf bezeichnet, wenn es einen Anteil an organischem

Kohlenstoff von mehr als 30% besitzt. Hat die Torfschicht eine Mächtigkeit von mindestens 30 Zentimeter erreicht, gilt sie ausserdem als **Moorboden**² (Trepel, 2007). Wächst das Moor weiter, stellt diese Schicht die erste Stufe der Inkohlung dar. Ein natürlicher Prozess für die Entstehung von Kohle in einem Zeitraum von Jahrmillionen. Durch den zunehmenden Druck in Bodentiefe und Abnahme des Wassergehalts entsteht aus Torf, über die Zwischenstufen Braunkohle und Steinkohle, am Ende Anthrazit (Weertz, 2010).

Die Bildung von Torf beginnt mit der Photosynthese der Moorvegetation. Diese nimmt CO₂ aus der Atmosphäre auf und baut es zu organischem Kohlenstoff in ihre Biomasse um (Abbildung 6). Ein geringer Anteil des aufgenommenen CO₂ wird dabei durch die natürliche Atmung (aerobe Respiration) wieder in die Atmosphäre abgegeben. Stirbt die Moorvegetation ab und landet im wassergesättigten Katotelm, wird sie aufgrund der fehlenden abbauenden Organismen nicht vollständig zersetzt. Die abgestorbene Biomasse wird so in Form von Torf akkumuliert. Auf diese Weise wird CO₂ aus der Atmosphäre dauerhaft in Moorböden gespeichert. Dennoch entstehen bei diesem Prozess Treibhausgas-Emissionen, denn die sauerstofffreie Schicht ist nicht komplett von Destruenten befreit. Einige Bakterien setzen unter anaeroben Bedingungen beim Abbau von Kohlenstoffverbindungen geringe Mengen an Methan frei, die in die Atmosphäre entweichen. Die Klimawirksamkeit von Methan ist dabei viel höher als die des CO₂. Umgerechnet in CO₂-Äquivalente ist die Klimawirksamkeit eines Kilogramms Methan 28-mal höher als die eines Kilogramms CO₂. Die emittierende Menge ist allerdings so gering, dass in einem torfbildenden Moor gleich viel gespeichert wie freigesetzt wird. In einem Zeithorizont von 100 Jahren sind Moore daher klimaneutral. Da aber Methan im Vergleich eine viel geringere Halbwertszeit besitzt, überwiegt in einem längeren Zeithorizont die Speicherung von CO₂. Torfbildende Moore gelten als **CO₂-Senken** und haben somit langfristig eine kühlende Wirkung auf das Klima (Trepel, 2007). Verursachen hingegen Störungen zu einer Veränderung des Systems, kann sich diese Bilanz verschieben. Gelangt beispielsweise durch Absenkung des Wasserspiegels die Torfschicht in Kontakt mit Sauerstoff, setzt sich der mikrobielle Abbau in Gang. Ähnlich wie die abgestorbene Vegetation in den Wäldern und auf den Wiesen wird der Torf zu Streu und Humus abgebaut und setzt CO₂ wieder in die Atmosphäre frei. Ein gestörtes Moor wird auf diese Weise zu einer **CO₂-Quelle**. Das aufsteigende Methan von tieferen Schichten oxidiert bei der Passage durch die aerobe Zone zu

² In der Schweiz wird die Identifizierung der Moore auf Basis der Vegetation vollzogen. Die Schweizer Definition von einem Moor ist daher nicht an eine Torfschicht gebunden.

CO₂. In einem entwässerten Moor entstehen daher keine Methanemissionen. Je nach Standort kommt es zudem zu Emissionen von Lachgas. Besonders bei stark gedüngten Flächen ist dies der Fall. Das Lachgas ist ein Zwischenprodukt der Denitrifikation, die bei Entwässerung ebenfalls gestört wird. Die Denitrifikation in organischen Böden ist eine Kette von Umwandlungen durch Bakterien, die aus Nitrat (NO₃⁻) molekularen Stickstoff (N₂) herstellen. Die Klimawirksamkeit von Lachgas ist noch höher als die des Methans (Trepel, 2007).

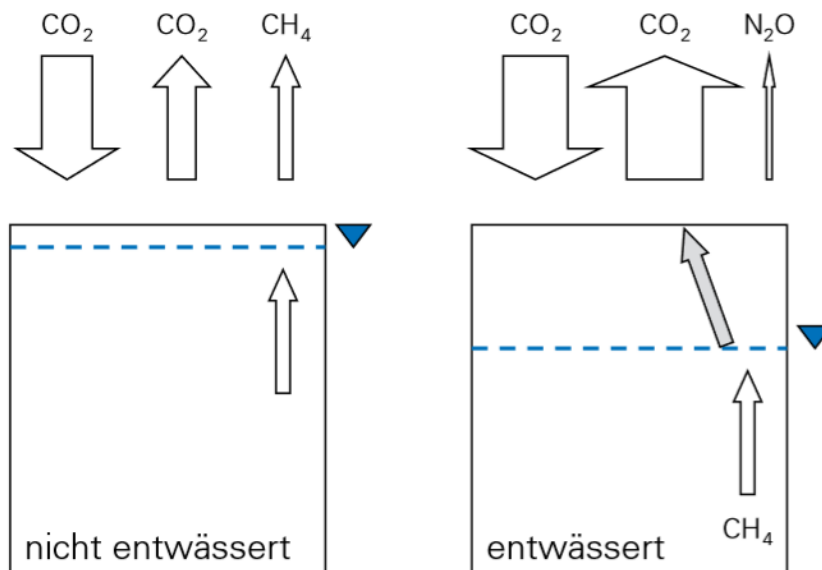


Abbildung 6: Emissionen von Treibhausgasen in nicht entwässerten und entwässerten Moorböden. Die blau gestrichelte Linie zeigt den Wasserstand (Quelle: Trepel, 2007).

3.4 Funktionen und Schutzwert

Hochmoore besitzen einen hohen Schutzwert, denn sie erfüllen eine Vielzahl an wichtigen Funktionen für die Umwelt. Unter anderem dienen sie als wertvollen **Lebensraum für seltene Tier- und Pflanzenarten**. Im Vergleich zu anderen Moortypen sind Hochmoore artenarme Lebensräume, besitzen aber einige Biotopsspezialisten. Durch die extremen Bedingungen entwickelten sich hochspezialisierte Tiere und Pflanzen, die nur in Hochmooren vorkommen. Ihr Überleben ist daher unmittelbar an den Erhalt dieser Lebensräume geknüpft (BUWAL, 2002). Neben einem Dutzend Torfmoose, betrifft dies auch einige Lebermoos- und Blütenpflanzenarten. Viele davon sind in der «Roten Liste» der gefährdeten und seltenen Arten der Schweiz verzeichnet. Beispielsweise findet man den Sonnentau, eine fleischfressende Pflanze, auf dieser Liste. In den nährstoffarmen Hochmooren deckt sie ihren Bedarf an Stickstoff, indem sie mit ihren klebrigen Blättern Insekten fängt (Grünig, 1986). Auch Tierarten, vor allem Insekten, sind auf Hochmoore angewiesen. So zum Beispiel die Hochmoor-Mosaikjungfer, die in den Sommermonaten vorwiegend in hochgelegenen

Hochmooren vorkommt. Sie ist auf der «Roten Liste» als gefährdet eingestuft (Keller, 2012). Hochmoore sind somit für das Überleben von seltenen und gefährdeten Tier- und Pflanzenarten Voraussetzung. Die Zerstörung dieser Lebensräume führt automatisch zum Verlust einer wissenschaftlich interessanten und ethisch wertvollen Tier- und Pflanzenwelt (Grünig, 1986).

Im Einzugsgebiet leisten Moore bedeutsame Aufgaben in der **Regulierung der Wasserflüsse**. Durch ihre hohe Kapazität zur Wasseraufnahme halten sie bei starken Niederschlägen grosse Mengen an Regenwasser zurück. Seit Rückgang der Moorflächen ist folglich das Risiko von Überschwemmungen gestiegen. Dank den hohen Verdunstungsraten wirken Moore zudem auch kurzfristig **kühlend auf das lokale Klima** (Trepel, 2007).

Auf globaler Ebene sind Moore ein **zentraler Bestandteil des Kohlenstoffkreislaufs**. Weltweit existieren rund 4,6 Millionen Quadratkilometer Moorgebiete. Dies entspricht etwa 13-mal die Fläche von Deutschland. Der Grossteil dieser Moorgebiete befindet sich entlang des Taiga-Gürtels in Russland und Kanada (Läubli, 2018). Trotz ihrem geringen Vorkommen mit weltweit nur 3% der Landoberfläche, speichern sie ca. 450 bis 500 Gigatonnen an Kohlenstoff. Diese Menge entspricht einem Drittel der weltweiten Kohlenstoffvorräte im Boden (1'500 Gigatonnen). Zum Vergleich; in der gesamten Biomasse der Landpflanzen sind 560 Gigatonnen gespeichert. Moorböden stellen somit - wie die gesamte Vegetation der Erde - einen gigantischen Kohlenstoffvorrat dar. Entsprechend werden bei der Zerstörung der Moore grosse Mengen an Treibhausgasen, besonders CO₂, in die Atmosphäre freigesetzt. Eine Zunahme der Konzentration von CO₂ führt zu einer Erwärmung des Klimas. Seit Beginn der Industrialisierung stieg die Konzentration von 280 ppmV (parts per million, Teile pro Million Volumenanteil) auf heute über 410 ppmV. Dieser Anstieg hat bereits eine mittlere Erwärmung um einen Grad verursacht (Rahmstorf, 2017). Verschiedene Projektionen globaler Erwärmung gehen davon aus, dass sich bis 2085 die mittlere Temperatur der Sommermonate in der Schweiz um weitere 3,3 bis 5,4 Grad im Vergleich zu heute erhöht (Speicher, 2018). In der Bestrebung dies zu verhindern oder zumindest zu mildern, müssen Wege gefunden werden, um Treibhausgas-Emissionen zu reduzieren. Eine ideale Möglichkeit dazu stellen die Moore dar. Denn der Schutz und die Renaturierung eines gestörten Moors führen nicht nur zur Reduzierung der Emissionen, sondern auch zu einer natürlichen Senke.

Weitere nennenswerte Ökosystemdienstleistungen der Moore haben einen historischen oder kulturellen Wert. Denn in den mehreren jahrtausendalten Torfschichten der Moore ist nicht nur organischer Kohlenstoff gespeichert, sondern auch die Vegetations- und Klimageschichte der Schweiz. Proben aus alten Torfschichten enthalten damals eingewehte Pollenkörner, die

konserviert wurden und deren Art auch noch nach tausenden von Jahren bestimmt werden kann. Die daraus resultierende Zusammensetzung der Pollen in einer Torfschicht widerspiegelt die Vegetation in der Umgebung zur Zeit, als die Pollenkörner sich auf der Mooroberfläche ablagerten. Dadurch kann zum Beispiel herausgefunden werden, welche Baumart in welcher Periode dominierte. Ein intaktes Moor fungiert auf diese Weise als ein **Umweltarchiv** (BUWAL, 2002). Der kulturelle Wert beruht auf dem Erscheinungsbild eines Moores. Denn wie andere natürliche Landschaften, werden auch Moorlandschaften als schön empfunden. Sie tragen damit bei der **Aufwertung des Landschaftsbildes** bei. Als Teil der Landschaft und Natur besitzen sie auch eine Funktion in der **Erholung und Freizeit**. Viele Menschen verbringen die Freizeit in der Natur, um sich zu erholen. Eine naturnahe und schöne Landschaft - wie die einer Moorlandschaft - trägt dazu bei (BfN, 2017).

4 Methodik

Im Rahmen dieser Arbeit wurde abgeschätzt, wie viel CO₂ in den Hochmooren des Entlebuchs aktuell gespeichert ist. Anschliessend wurde ermittelt, wie sich der Speicher momentan verändert. Im Perimeter der UNESCO Biosphäre Entlebuch befinden sich 45 Objekte aus der Liste des Bundesinventars der Hoch- und Übergangsmoore von nationaler Bedeutung, die als Hochmoor kategorisiert sind. Insgesamt bedecken sie eine Fläche von 173 Hektaren.



Abbildung 7: Messung der Mächtigkeit mit der Sondierstange (Quelle: eigenes Bild)

Zur Berechnung des Torfvolumens und der Abschätzung des CO₂-Speichers musste unter anderem eine Kategorisierung der Hochmoore vorgenommen werden. Die dafür erforderlichen Angaben, wie beispielsweise die Flächen der einzelnen Hochmoore, liessen sich aus der Literatur entnehmen. Die Mächtigkeit musste durch Feldarbeit selbst ermittelt werden (Abbildung 7). Da die Messung aller Hochmoorobjekte im behandelten Perimeter für den Umfang dieser Arbeit zu aufwändig gewesen wäre, wurde nur eine geeignete Auswahl als Stichprobe gewählt. Dazu wurden die Hochmoore nach ihrer Ausbildungsform und Höhenlage in mehrere Kategorien eingeteilt und jeweils nur einen Teil einer Kategorie untersucht. Mit den Ergebnissen wurde ein Mittelwert der jeweiligen Kategorie berechnet und auf die nicht untersuchten Hochmoore extrapoliert. Das Volumen der Hochmoore wurde schliesslich mit einem vom Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL) entwickelten Ansatz in die Menge an organischen Kohlenstoff umrechnen. Dieser Wert konnte wiederum in CO₂-Äquivalente umgerechnet werden. Daraus resultierte die Quantifizierung des CO₂-Speichers der Hochmoore im Entlebuch.

Im Fokus des zweiten Teils dieser Arbeit stand die Abschätzung der momentanen Veränderung des CO₂-Speichers anhand der Zustände der Hochmoore. Gemäss einer Beurteilung der Hochmoore befindet sich die Mehrheit in einem schlechten Zustand (Knaus 2009). Zudem werden die Emissionsveränderungen aufgezeigt unter Berücksichtigung zweier unterschiedlicher Szenarien, wenn sich alle Hochmoore in einem naturnahen oder stark gestörten Zustand befänden.

4.1 Kategorisierung der Hochmoore

Ausgangspunkt für die Feldarbeit und die Berechnung des CO₂-Speichers der Hochmoore war die Kategorisierung der einzelnen Hochmoorobjekte. Die Absicht war dabei, die Hochmoore so einzuteilen, dass sie innerhalb derselben Kategorie eine möglichst identische Torfmächtigkeit aufweisen. Somit ist es annehmbar, eine repräsentative Auswahl jeder Kategorie zu messen und die resultierenden Mittelwerte auf die nicht untersuchten Hochmoore zu extrapolieren. Eine Untersuchung aller Hochmoorobjekte wäre für den Umfang dieser Arbeit zu aufwändig gewesen. Die Feldarbeit für die Messungen aller Hochmoorobjekte hätte zu viel Zeit in Anspruch genommen. Dazu hätten die beschränkte Erreichbarkeit und die teilweise schwierige Zugänglichkeit von einigen Hochmooren die Messungen erschwert.

Um die Hochmoore in Kategorien mit derselben Mächtigkeit einzuteilen, mussten mehrere Annahmen bezüglich der Moorentwicklung getroffen werden. Es wurde beispielsweise angenommen, dass alle Hochmoore im Entlebuch nach der letzten Eiszeit vor 10'000 Jahren entstanden sind und demnach ungefähr das gleiche Alter haben. Da sie sich zudem alle in derselben Region befinden, entwickelten sie sich alle unter ähnlichen klimatischen Bedingungen. So wurde stark vereinfacht angenommen, dass alle Hochmoore im Entlebuch eine identische Mächtigkeit entwickelt haben. Einzige Unterschiede zwischen den Hochmooren liegen in lokalen Gegebenheiten wie der Topografie und Höhenlage. Auf Basis dieser zwei Unterschiede wurden für die Kategorisierung zwei Varianten erstellt. In «Variante 1» wurden die Hochmoore anhand der umgebenden Topografie und der damit direkt verbundenen Ausbildungsform eingeteilt, in «Variante 2» nach ihrer Höhenlage (Tabelle 1 und 2).

Die Topografie eines Hochmoors bestimmt die Geschwindigkeit und Menge des abfliessenden Wassers. Je schwächer der Abfluss, desto voluminöser ist die wassergesättigte Schicht und effektiver die Torfbildung. So entstehen während der Entwicklung der Moore je nach Topografie verschiedene Ausbildungsformen mit unterschiedlichen Torfmächtigkeiten. Die Angaben zur Ausbildungsform wurden aus dem ausführlichen Inventar der Hoch- und Übergangsmoore des Kantons Luzern (1991) übernommen. Im Inventar sind sechs verschiedene Kategorien vorhanden (Tabelle 1). Die grosse Mehrheit der Hochmoore ist entweder als Hanghochmoor oder sekundäres Hochmoor eingeteilt. Als sekundäre Hochmoore wurden damals solche erfasst, die bereits stark abgetorft und degradiert wurden. Deren Ausbildungsform ist stark beeinträchtigt und nicht mehr vergleichbar. Von den Sattelhochmooren und Kuppenmooren existieren nur noch wenige und von den zentrischen Hochmooren gar keine Exemplare im Entlebuch. Die ebenso wenigen Hochlagenhochmoore

wurden neu eingeteilt. Sie wurden damals nach ihrer Höhenlage eingestuft, nicht nach der Ausbildungsform. Des Weiteren fehlten von 4 der 45 Hochmooren die Angaben im Inventar. Diese wurden - wie die Hochlagenhochmoore - gemäss ihren Höhenlinien auf der «swisstopo» Karte eingeteilt.

Tabelle 1: Kategorien der Variante 1

Kategorien der Variante 1	Anzahl	Bemerkung
Zentrisches Hochmoor	-	keine vorhanden in der UBE
Decken- und Kuppenmoor	3	
Sattelhochmoor	4	
Hanghochmoor	20	
Hochlagenhochmoor	-	auf die anderen Kategorien verteilt
Sekundäres Hochmoor	18	

Entsprechend der Höhenlage unterliegen die Moore leicht unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wie Temperaturen und Niederschlägen. Mit steigender Höhe nehmen die Temperatur ab und Niederschläge zu (Climate-Data, 2012). Die niedrigeren Temperaturen hemmen die biochemischen Prozesse, was dazu führt, dass die Moorvegetation langsamer wächst und die mikrobielle Zersetzung im Katotelm noch stärker gehemmt ist (Ramann, 2013). Zudem ist die Menge an Niederschlag höher, die die Hochmoore mit mehr Regenwasser versorgt. Die Voraussetzungen für die Bildung von Torf variieren also leicht je nach Höhenlage. Es wurde daher angenommen, einen Unterschied in der Torfmächtigkeit auf unterschiedlichen Höhenlagen vorzufinden und dazu Stufen von 200 Metern ausgewählt. Die Hochmoore in der UBE sind zwischen 840 und 1'745 Meter über dem Meer (m. ü. M.) verteilt. Da die Stichprobe keine Hochmoore über 1'400 m. ü. M. beinhaltete, ergaben sich nur die drei Kategorien «bis 1'000 m. ü. M.», «1'000 bis 1'200 m. ü. M.» und «ab 1'200 m. ü. M.» (Tabelle 2). Die grosse Mehrheit der Hochmoore lag dadurch in der letzten Kategorie. Die erste Kategorie umfasste im Vergleich nur zwei Hochmoore. Diese sind allerdings beide in der Stichprobe vertreten.

Tabelle 2: Kategorien der Variante 2

Kategorien der Variante 2	Anzahl	Bemerkung
Bis 1'000 m. ü. M.	2	beide in der Stichprobe
1'000 bis 1'200 m. ü. M.	6	
Ab 1'200 m. ü. M.	37	

4.2 Feldarbeit: Messung der Mächtigkeit

Als Grundlage für die Auswahl der Stichprobe diente die Kategorisierung der Hochmoore und die interaktive Karte des Bundesamtes für Landestopografie «swisstopo». Wichtig bei der Auswahl der geeigneten Stichprobe war von jeder Kategorie genügend Objekte zu untersuchen, damit ein möglichst genauer Mittelwert berechnet werden konnte und eine Hochrechnung überhaupt möglich wurde. Mit Hilfe der interaktiven Karte konnte die Erreichbarkeit der Auswahl geprüft und die Anfahrt geplant werden. Über die Einstellungen der Karte lassen sich die einzelnen Hochmoorobjekte anzeigen (Abbildung 8). Dabei stellen rot gefärbte Flächen primäre und gelb gefärbte sekundäre Hochmoorflächen dar. Diese Einteilung erfolgt auf die jeweiligen Zustände der Flächen. Als primäre Hochmoorflächen gelten Hochmoore, die sich mehr oder weniger in einem natürlichen Zustand befinden und man annehmen kann, dass Torfwachstum stattfindet. Sekundäre Hochmoorflächen sind hingegen von menschlichen Aktivitäten stark beeinflusst und gestört. Die Einteilung ist allerdings bereits beinahe 30 Jahre alt und nicht mehr auf dem aktuellsten Stand. Zudem sind einige der sekundären Hochmoorflächen inzwischen aufgewertet und renaturiert worden. Die grünen Flächen sind das direkte Moorumfeld, das die Hochmoorflächen umgibt. Sie gilt als Pufferzone zwischen der Hochmoorfläche und dem Raum mit menschlichen Aktivitäten und landwirtschaftlicher Nutzung. Diese Zone wurde in dieser Arbeit nicht untersucht.

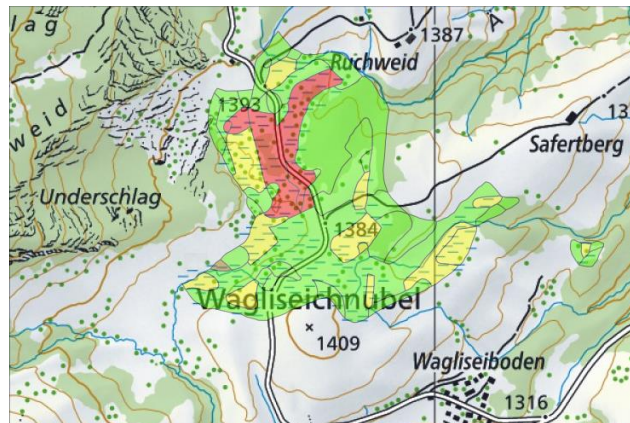


Abbildung 8: Ausschnitt der Karte (Quelle: Karte «swisstopo»)

Die Messung der Mächtigkeit wurde mit einer massiven Lawinen-Sondierstange durchgeführt, die aus mehreren Einheiten besteht. Eine Einheit hat im Durchschnitt eine Länge von 53 Zentimeter und einen Durchmesser von 12 Millimeter (Abbildung 9). Die Stange lässt sich leicht in den Torfkörper einführen bis man auf ein Hindernis trifft. Traf man bei mehreren Versuchen bei gleicher Tiefe auf ein Hindernis, musste man davon ausgehen, den Mineralboden und das Ende des Torfkörpers erreicht zu haben. Generell wurde mit der Annahme gearbeitet, dass ein Hochmoor eine Mächtigkeit von durchschnittlich zwei Meter aufweist. Konnte nicht wie erwartet bis in diese Tiefe eingedrungen werden, musste man annehmen auf einen Stein oder eine Wurzel gestossen zu sein. In diesen Fällen wiederholte wurde der Stich mehrmals wiederholt. Um einen Mittelwert für die Mächtigkeit zu erhalten, wurde ein Transekt von einem Ende der Moorfläche zum anderen gewählt. Ein Transekt ist ein Satz von Mess- bzw.

Beobachtungspunkten entlang einer geraden Linie (Abbildung 10). Dabei wurde in Abständen von 10 Meter eine Messung durchgeführt und pro Transekt schliesslich einen Mittelwert errechnet. Insgesamt wurde die UBE für die Feldarbeit vier Mal besucht und dabei acht verschiedenen Hochmoorobjekte untersucht. In den beiden Hochmooren «Wagliseichnubel» und «Fuchserenmoos/Geugelhusenmoos» wurden drei, bzw. zwei Flächen und in den restlichen jeweils eine Fläche ausgewählt. Pro zusammenhängende Moorfläche wurden zwei bis drei Transekte mit 4 bis 15 Messpunkten gemessen, je nach Grösse der Fläche.



Abbildung 9: Einheiten der Sondierstange (Quelle: eigenes Bild)



Abbildung 10: Beispiel von zwei Transekten auf einer Hochmoorfläche (Quelle: Karte «swisstopo»)

4.3 Abschätzung des CO₂-Speichers

Aus den Ergebnissen der Feldarbeit wurde für jede Kategorie der Varianten 1 und 2 für die Mächtigkeit einen Mittelwert erstellt. Dieser wurde auf die nicht untersuchten Hochmoore derselben Kategorie extrapoliert. In einer dritten Variante ohne Kategorien wurde einen Gesamt-Mittelwert aus allen Messungen errechnet, der auf alle nicht untersuchten Hochmoore übertragen wurde. Die Angaben zu den Flächen der einzelnen Hochmoore wurden aus dem Inventar für Hoch- und Übergangshochmoore des Kantons Luzern (Kt. Luzern, 1991), sowie dem online Geoportal der Schweiz übernommen (Swisstopo, 2018). Durch die Multiplikation der Fläche und Mächtigkeit resultierte das Volumen der Hochmoore. Mit dem Umrechnungswert von Gubler (2015), der pro Hektar und 50 Zentimeter Mächtigkeit einen Wert von 1'026 Tonnen CO₂-Äquivalente annimmt, wurde das Volumen in den CO₂-Speicher umgerechnet. Für die Umrechnung von CO₂-Äquivalente in Torf wurde ein Faktor von 2:1 verwendet (Gubler, 2015).

4.4 Abschätzung der Veränderung

Gemäss der Beurteilung von Knaus (2009) befindet sich die Mehrheit der Hochmoore in der UBE in einem schlechten Zustand. Von allen 45 untersuchten Flächen können nur drei als intakt eingestuft werden. Trotz Schutz sind die Hochmoore menschlichen Störungen und den zunehmenden trockenen Klimabedingungen ausgesetzt. Entwässerungen von alten Drainagen und Nährstoffeinträge aus der Landwirtschaft sowie aus der Luft beeinträchtigen langfristig die Sicherung der ökologischen Qualität (Knaus, 2009).

Um die momentane Veränderung des CO₂-Speichers zu berechnen, wurden die Messergebnisse zu den Treibhausgasbilanzen der Moore von Drösler (2011) und dem Weltklimarat (IPCC) (2014) übernommen. Für verschiedene Nutzungskategorien der Moore ermittelten sie jeweils einen Mittelwert der CO₂-Emissionen und die minimalen, wie auch maximalen Abweichungen. Von Drösler wurden die Kategorien «Hochmoor naturnahe/renaturiert» und «Hochmoor trocken» und vom IPCC entsprechend die Kategorien «Hochmoor naturnahe/wiedervernässt» und «Grasland extensiv trocken» übernommen (Drösler 2011 und IPCC 2014). Die naturnahen Hochmoore beinhalten Standorte mit natürlichem Wasserstand, die langfristig unberührt blieben oder in den letzten Jahren renaturiert wurden. Diese Kategorie ist bei beiden Quellen gleich definiert und wurde fortan zu Kategorie «Naturnahe» zusammengefügt. Bei den trockenen Hochmooren handelt es sich um degenerierte und zum Teil entwässerte Hochmoore. Der IPCC bezeichnet die Kategorie als extensiv genutztes Grasland. Diese Kategorie ist vergleichbar mit einem gestörten und entwässerten Hochmoor und wurde daher mit der Kategorie «Trocken» zusammengeführt. In der Beurteilung der Zustände von Knaus (2009) gibt es vier Kategorien «intakt», «leicht gestört», «gestört» und «stark gestört». Einige der gestörten Hochmoore wurden inzwischen renaturiert, daher ist die Beurteilung von 2009 nicht mehr auf dem aktuellsten Stand (Eva Frei, brieflich). Aus diesem Grund wurden drei weitere Zustände eingeführt, in welche die unterschiedlich gestörten, aber mittlerweile renaturierten Hochmoore eingeteilt wurden. Die Zuordnung ist in Tabelle 3 ersichtlich und erfolgte nach eigenem Ermessen. Sind beispielsweise die Hochmoore intakt oder nur leicht gestört aber renaturiert, wurden sie zum minimalsten Wert der Kategorie «Naturnahe» eingeteilt. Dieser Wert ist negativ; es wird also davon ausgegangen, dass diese Hochmoore erneut Torf bilden und somit CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen. Die renaturierten, gestörten Flächen sind wahrscheinlich noch nicht in einem torfbildenden Zustand. Hier wurde jeweils der Mittelwert der Kategorie «Naturnahe» angenommen. Die stark gestörten aber mittlerweile renaturierten Hochmoore sind entsprechend noch weniger torfbildend, daher der Maximum-Wert der Kategorie «Naturnahe». Für die restlichen gestörten Hochmoore wurde die Kategorie

«Trocken» genutzt und anhand der Reihenfolge der Zustände den drei Werten (Minimum, Mittelwert, Maximum) zugeteilt. Die Skala der Werte reicht bei Drösler von -1,8 bis 12,1 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Hektar und Jahr (Tabelle 3). Beim IPCC liegen die Werte zwischen -1,4 und 25,3 Tonnen. Die Werte von Drösler sind im Vergleich somit etwas konservativer. Eine konservative Abschätzung puffert die Unsicherheiten und Datenlücken in der Quantifizierung, um auf der sicheren Seite zu stehen.

Tabelle 3: Zuordnung der Zustände der Hochmoore zur passenden Nutzungskategorie. Dazu die Emissionen in Tonnen CO₂ Äquivalente pro Hektar und Jahr von Drösler und dem IPCC (Quellen: Knaus 2009, Drösler 2011 und IPCC 2014).

Zustand nach Knaus	Kategorie nach Drösler/IPCC	CO ₂ -Äquivalente ha ⁻¹ a ⁻¹ [t]	
Intakt	Naturnahe Minimum	-1,8	bis -1,4
Leicht gestört (renaturiert)	Naturnahe Minimum	-1,8	bis -1,4
Gestört (renaturiert)	Naturnahe Mittelwert	0,1	bis 3,5
Stark gestört (renaturiert)	Naturnahe Maximum	2,9	bis 18,0
Leicht gestört	Trocken Minimum	5,3	bis 13,6
Gestört	Trocken Mittelwert	9,6	bis 19,4
Stark gestört	Trocken Maximum	12,1	bis 25,3

Mittels Zuordnung und Multiplikation der Hochmoorflächen und den passenden Emissionswerten erhält man die momentanen Emissionen in Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr. Da gestörte Moore nicht nur CO₂-Quellen sind, sondern ebenso verlorene CO₂-Senken, musste für die Gesamtbilanz zusätzlich zur CO₂-Emission auch die fehlende potenzielle Senke berücksichtigt werden. Um mögliche Entwicklungen der Emissionen in Zukunft aufzuzeigen, wurden zwei Szenarien «renaturiert» und «stark gestört» erstellt. In Szenario «renaturiert» wurde davon ausgegangen, dass alle Hochmoore renaturiert werden und sich in einem naturnahen und torfbildenden Zustand befinden. In diesem Fall wurde bei allen der niedrigste, negative Wert von Drösler und dem IPCC eingesetzt, der von einer Senke ausgeht. In Szenario «stark gestört» wurde der höchste Wert eingesetzt und angenommen, dass alle Hochmoore im Status Quo ohne aktive Schutzmassnahmen unter bereits erwähnten negativen Einflüssen weiter degenerieren. Mit diesen beiden Werten sollte aufgezeigt werden wie viel CO₂ im Jahr im idealsten, bzw. im schlechtesten Fall gebunden oder freigesetzt werden könnten.

5 Ergebnisse

5.1 Feldarbeit und Mittelwerte

Die Torfmächtigkeiten der Entlebucher Moore liegen im Schnitt zwischen 0,8 und 3,1 Meter (Tabelle 4). Das Hanghochmoor «Zopf» weist dabei die geringste Mächtigkeit auf, während das «Tällenmoos», ein sekundäres und degeneriertes Hochmoor, das mächtigste ist. Der Mittelwert aller untersuchten Hochmoore beträgt zwei Meter. Die höchste bzw. kleinste Einzelmessung ergab einen Wert von über 4,5 bzw. 0,3 Meter.

Tabelle 4: Untersuchte Hochmoorobjekte der UBE, Kategorien der Variante 1 und 2 und Mittelwerte der Mächtigkeit.

Hochmoorobjekt	Kategorie Variante 1	Kategorie Variante 2	Mittelwert [m]
Balmoos	Sekundäres Hochmoor	Bis 1'000 m. ü. M.	2,7
Salwidi	Sattelhochmoor	Ab 1'200 m. ü. M.	1,8
Zopf/Salwidi	Hanghochmoor	Ab 1'200 m. ü. M.	2,2
Zopf	Hanghochmoor	Ab 1'200 m. ü. M.	0,8
Fuchserenmoos/G.	Sekundäres Hochmoor	1'000 – 1'200 m. ü. M.	1,7
Mettelimoos	Sekundäres Hochmoor	1'000 – 1'200 m. ü. M.	2,1
Tällenmoos	Sekundäres Hochmoor	Bis 1'000 m. ü. M.	3,1
Wagliseichnubel	Hanghochmoor	Ab 1'200 m. ü. M.	1,8
Mittelwert			2,0

In den nachstehenden Tabellen 5 und 6 sind die Mittelwerte der Kategorien der Varianten 1 und 2 zusammengefasst. Die Verteilung der Objekte auf die Kategorien fiel dabei nicht ideal aus: Das Sattelhochmoor ist mit nur einem Objekt in der Stichprobe untervertreten, während das Kuppen- und Deckenmoor gar nicht vertreten sind. In der Variante 2 sind die Objekte in der Stichprobe gleichmässiger auf die Kategorien verteilt. Die Datenlücke der Kuppen- und Deckenmoore wurden mit einem Mittelwert aus der Literatur gedeckt: Gemäss Definition besitzen diese Moore eine geringe Mächtigkeit, sodass zum Teil der Mineralboden noch sichtbar ist (Wünsche, 2004). Es wurde daher davon ausgegangen, dass Deckenmoore ca. eine Mächtigkeit von 50 Zentimeter besitzen. Da es von dieser Kategorie nur drei Objekte in der UBE mit einer sehr kleinen Fläche gibt, hat diese Ungenauigkeit keinen gewichtigen Einfluss und trägt, dank der geringen angenommenen Mächtigkeit, eher zu einer konservativen Berechnung bei.

Tabelle 5: Mittelwerte der Mächtigkeit (Variante 1)

Kategorien der Variante 1	Mittelwerte der Mächtigkeit [m]	Stichprobe
Hanghochmoore	1,7	3
Sattelhochmoore	1,8	1
Decken- und Kuppenmoore	0,5	-
Sekundäre Hochmoore	2,0	4

Tabelle 6: Mittelwerte der Mächtigkeit (Variante 2)

Kategorien der Variante 2	Mittelwerte der Mächtigkeit [m]	Stichprobe
Bis 1'000 m. ü. M.	2,9	2
1'000 – 1'200 m. ü. M.	1,8	2
Ab 1'200 m. ü. M.	1,7	4

5.2 CO₂-Speicher

Um bei allen Hochmooren einen Wert für die Mächtigkeit zu erhalten, wurden die Mittelwerte auf die nicht untersuchten Hochmoore derselben Kategorie extrapoliert. In Variante 1 und 2 wurden die entsprechenden Mittelwerte aus den Tabellen 5 und 6 übernommen. Für die Variante 3 wurde der Mittelwert aller Messungen zusammen gewählt. Bei den «sekundären Hochmooren» in Variante 1 machte eine Extrapolation keinen Sinn, zumal sie keine einheitliche Kategorie für die Ausbildungsform bilden. Da nur 4 von 18 «sekundären Hochmoore» untersucht wurden, musste für die übrigen 14 der Mittelwert aus der Variante 3 übernehmen werden. Auf diese Weise erhielten alle Hochmoore in allen drei Varianten einen Wert für die Mächtigkeit. Multipliziert man diesen mit der jeweiligen Fläche des Hochmoors, erhält man das Volumen (Tabelle 7 bis 9). Das gesamte Volumen der Hochmoore im Entlebuch hat eine Grösse von 3,1 bis 3,4 Mio. Kubikmeter. Umgerechnet in CO₂-Äquivalente ergibt das einen CO₂-Speicher von zwischen 628 und 699 Kilotonnen.

Tabelle 7: Grösse und Speicher der Hochmoore (Variante 1)

Grösse und Speicher nach Variante 1 (Ausbildungsform)	
Total Volumen [m ³]	3'088'370
Total Masse Torf [t]	311'059
Total org. Kohlenstoff [t]	172'949
Total Speicher CO ₂ -Äquivalente [t]	633'733

Tabelle 8: Grösse und Speicher der Hochmoore (Variante 2)

Grösse und Speicher nach Variante 2 (Höhenlage)	
Total Volumen [m ³]	3'060'141
Total Masse Torf [t]	308'216
Total org. Kohlenstoff [t]	171'368
Total Speicher CO ₂ -Äquivalente [t]	627'941

Tabelle 9: Grösse und Speicher der Hochmoore (Variante 3)

Grösse und Speicher nach Variante 3 (Mittelwert)	
Total Volumen [m ³]	3'408'153
Total Masse Torf [t]	343'267
Total org. Kohlenstoff [t]	190'857
Total Speicher CO ₂ -Äquivalente [t]	699'353

5.3 Veränderung des CO₂-Speichers

Wie sich der Die CO₂-Speicher momentan jährlich verändert, liess sich über den aktuellen Zustand der Hochmoore abschätzen. Mit den eingesetzten Werten von Drösler (2011), wie auch vom IPCC (2014), werden momentan Treibhausgase freigesetzt (Tabelle 10 und 11). Nach den Werten von Drösler, die im Vergleich zu den Werten vom IPCC konservativer ausfallen, entstehen jährlich Emissionen von 523 Tonnen CO₂-Äquivalente. Bezieht man die fehlende Senke mit ein, sammeln sich pro Jahr insgesamt 761 Tonnen CO₂-Äquivalente in der Atmosphäre an. Weit grösser sind die Emissionen nach den Werten vom IPCC mit bis zu 1'688 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr. In organischen Kohlenstoff und Torf ausgedrückt sind das jährlich 143 bis 410, bzw. 257 bis 738 Tonnen.

Tabelle 10: Emissionen und Verluste der Hochmoore in der UBE pro Jahr nach Drösler

Emissionen pro Jahr (Drösler)	
Emissionen in CO ₂ -Äquivalente [t]	523
Fehlende Senke in CO ₂ -Äquivalente [t]	-238
Verlust org. Kohlenstoff [t]	143
Verlust Torf [t]	257

Tabelle 11: Emissionen und Verluste der Hochmoore in der UBE pro Jahr nach IPCC

Emissionen pro Jahr (IPCC)	
Emissionen in CO ₂ -Äquivalente [t]	1'503
Fehlende Senke in CO ₂ -Äquivalente [t]	-185
Verlust org. Kohlenstoff [t]	410
Verlust Torf [t]	738

Wird davon ausgegangen, dass alle Hochmoore in der UBE renaturiert werden und sich fortan in einem naturnahen Zustand befinden, könnten die Hochmoore gesamt betrachtet als eine CO₂-Senke fungieren (Szenario «renaturiert»). Setzt man beispielsweise den besten Wert von Drösler (2011) und IPCC (2014) ein, ergibt das eine potenzielle Senke von 242 bis 311 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr (Tabelle 12). Wird allerdings angenommen, der Status Quo dauere an (anhaltende Drainage) und die Hochmoore werden zusätzlich negativen Einflüssen (wärmere Temperaturen, trockenere Sommer) ausgesetzt, so werden mit der Zeit alle Flächen ohne Ausnahme in die Kategorie «stark gestört» fallen (Szenario «stark gestört»). Setzt man demzufolge den höchsten Wert von Drösler und dem IPCC ein, würden zwischen 2'403 bis 4'617 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr in die Atmosphäre emittiert (Tabelle 13).

Tabelle 12: Szenario «renaturiert»

Szenario «renaturiert»	Speicherung pro Jahr in CO₂-Äquivalente [t]	in Torf [t]
Drösler	311	153
IPCC	242	119

Tabelle 13: Szenario «stark gestört»

Szenario «stark gestört»	Emissionen pro Jahr in CO₂-Äquivalente [t]	in Torf [t]
Drösler	2'403	1'179
IPCC	4'617	2'266

6 Diskussion

Die Ergebnisse für das Volumen der Moore in der UBE, die je nach verwendeter Variante für die Hochrechnung zwischen 3,1 bis 3,4 Millionen Kubikmeter betragen, entsprechen den Erwartungen. Werden für alle Hochmoore eine erwartete Mächtigkeit von zwei Meter angenommen, würde ein Volumen von 3,5 Millionen Kubikmeter resultieren. Umgerechnet in CO₂-Äquivalente ergibt das ein CO₂-Speicher von 628 bis 699 Kilotonnen CO₂ in der UBE. Das heisst bei einer Hochmoorfläche von 173 Hektaren sind 3'630 bis 4'043 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Hektar gespeichert. In einem Wald besteht der Vorrat zum Vergleich aus nur etwa 1'019 Tonnen pro Hektar (Klein, 2011). Ein Hektar Hochmoor in der UBE speichert demnach bis zu 4-mal mehr CO₂ als ein Wald.

Für die Emissionswerte wurden zwei unterschiedliche Quellen gewählt. Die Werte von Drösler sind im Vergleich zum IPCC konservativer, weshalb die Werte etwas stärker voneinander abweichen. Mit den verwendeten Werten (Drösler vs. IPCC) und der Berücksichtigung der fehlenden Senke, emittieren die Hochmoore in der UBE momentan rund 761 bis 1'688 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr. Pro Hektar sind das jährlich im Schnitt 4,5 bis 10 Tonnen. Zum Vergleich: die durchschnittliche Pro-Kopf-Emissionen der Schweizerinnen und Schweizer liegt bei 5,8 Tonnen pro Jahr (BAFU, 2018). Die Emissionen eines Hektars Hochmoor können daher mit diejenigen eines Menschen verglichen werden. Eine Tonne CO₂ entspricht ungefähr einer Autofahrt mit einem durchschnittlichen Benzinverbrauch von 8,5 Liter und einer Strecke von 5'000 Kilometer. In einem Zug könnte man vergleichsweise 450'000 Kilometer fahren bis eine Tonne CO₂ verursacht wird. Die gleiche Menge entsteht auch bei vier Flügen von Zürich nach London und zurück (carbon-connect AG, 2017). Bei einer Hochrechnung der durchschnittlichen Emissionswerte aus der UBE auf alle Hochmoore der Schweiz, betragen die jährlichen Emissionen ca. 6'750 bis 15'000 Tonnen CO₂-Äquivalente. Gemäss Schätzung von Gubler (2015) werden rund 19'000 Tonnen pro Jahr emittiert. Allerdings wurden für diese Schätzung ausschliesslich die Standardwerte vom IPCC verwendet. Die Hochrechnung auf Basis der durchschnittlichen Werte aus der UBE ist im Vergleich eine konservative Abschätzung.

Die Szenarien zeigen einen bedeutenden Unterschied der möglichen Emissionen zwischen einem naturnahen und stark gestörten Zustand der Hochmoore in der UBE. Als CO₂-Quelle ist das schädliche Klimapotenzial mit 2'403 bis 4'617 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr dabei viel grösser als die potenzielle Senkleistung von «nur» 242 bis 311 Tonnen CO₂. Dennoch bekräftigen beide Werte das Argument für die Hochmoor-Renaturierung: Nicht nur würden

grosse Mengen CO₂-Emissionen verhindert, es würden auch bedeutende Mengen aufgenommen und gespeichert. Die Renaturierung der Hochmoore ist daher ein ideales Mittel im Kampf gegen die steigenden Treibhausgas-Emissionen und dem Klimawandel. Die WSL schätzt, dass durch die Renaturierung aller Hochmoore in der Schweiz während den nächsten 50 Jahren eine Million CO₂-Äquivalente eingespart werden könnte (Breunig, 2018).

6.1 Fehlerquellen und Methodenkritik

Die Kategorisierung, wie auch die Extrapolation der Ergebnisse aus der Feldarbeit sind nicht durchgehend ideal ausgefallen. Während der Feldarbeit führten einige Messungen zu unerwarteten Ergebnissen, die eine Hochrechnung erschwerten und nicht plausibel erscheinen lassen. Beispielsweise wurde bei den Hochmooren «Mettelimoos» und «Tällenmoos» eine sehr geringe Mächtigkeit von nicht mehr als einen Meter erwartet. Denn beide sind gemäss Inventar als sekundäre und stark beeinträchtigte Hochmoore eingestuft. Einzelne Punktmessungen von über 4,5 Meter und Mittelwerte von bis zu 3,5 Meter waren daher eine Überraschung. Eine mögliche Erklärung ist, dass zufälligerweise die grössten Hochmoore für die Stichprobe ausgewählt wurden. Beide waren bereits 1900 in vielen Kartenwerken prominent vertreten und wurden industriell abgetorft. Sie müssen deshalb sehr alt sein und gute Voraussetzungen (Topografie und Klima) für die Bildung von Torf besitzen, der ja bereits zu einem gewissen Grad abgebaut wurde (Früh, 1904). Auf Grund dieser unerwarteten Ergebnisse entstand in der Variante 2 bei der Kategorie «bis 1'000 m» ein sehr hoher Wert von 2,9 Meter, der im Vergleich zu den anderen Werten stark abweicht. Ein solcher Unterschied der Mächtigkeit in Abhängigkeit der Höhenlage mag erstaunen. Eine mögliche Erklärung für diesen hohen Wert sind die in Kapitel 4.1 günstigeren Wachstumsbedingungen für Torf in niederen Lagen. Da diese Kategorie nur zwei Hochmoore betrifft, die gleichzeitig auch in der Stichprobe sind, ist eine Extrapolation nicht notwendig. Somit findet keine Überschätzung dieser Kategorie statt, welche auf diesem vielleicht zufällig so hohen Mittelwert zustande kommen könnte. Die anderen Werte aus der Feldarbeit und der Kategorisierung sind generell zufriedenstellend. Diese befinden sich alle ungefähr im Bereich von zwei Metern und stimmen mit den Erwartungen überein. Diese basierte auf der Literatur, die eine Mächtigkeit von 2 bis 10 Meter für Hochmoore in temperierten Breitengraden annimmt (Temsch, 2012). Da die Hochmoore im Entlebuch nicht älter als die letzte Eiszeit vor 10'000 Jahren sind und mehrheitlich durch den Menschen stark beeinträchtigt wurden, wurde vom niedrigsten und konservativsten Wert von zwei Meter ausgegangen. Trotz der Erfüllung der Erwartungen, sind alle Werte dennoch mit Vorsicht zu geniessen. Denn auch die Stichprobe fiel nicht für alle Kategorien ideal aus. Die Kategorisierung basierte zu Anfang der Arbeit auf einer anderen Grundlage. Zuerst wurden die

Hochmoore gemäss ihren ökologischen Zuständen eingeteilt, wie dies im Inventar der Hoch- und Übergangsmoore des Kantons Luzerns und auf der interaktiven Karte «swisstopo» der Fall ist. Auf Basis dieser Einteilung wurde die Auswahl der Stichprobe getroffen und die Feldarbeit durchgeführt. Nach neuen Überlegungen während der Arbeit und Besprechungen mit meinem Betreuer Florian Knaus und Moor-Expertin Lena Gubler kamen wir aber zur Schlussfolgerung, dass diese Herangehensweise nicht optimal ist. Durch den Zustand liesse sich nämlich nicht die Mächtigkeit ableiten oder vergleichen. Weiterführende Feldarbeit war allerdings nicht mehr möglich, da sich durch den eingetroffenen Schneefall im Entlebuch die Messungen verunmöglichten. So musste die Kategorisierung mit der vorhandenen Stichprobe durchgeführt werden, die lediglich 8 von 45 Hochmoorobjekten umfasst. Die Folge war, dass einige Kategorien nur mangelhaft oder gar nicht vertreten waren. Beispielsweise das «Sattelhochmoor» war mit nur einem Objekt etwas untervertreten, während von den «Decken- und Kuppenmoore» keines untersucht worden war. Bei der Variante 2 ergab die mangelhafte Stichprobe das Fehlen von Kategorien über 1'400 Meter über dem Meer. Die Kategorie «ab 1'200 m. ü. M.» ist daher mit 37 Objekte sehr gross. Die Hochmoore, die höher als 1'400 Meter über dem Meer liegen, wurden so auch mit dem Mittelwert der Kategorie «ab 1'200 m. ü. M.» extrapoliert. (Dies führte zu Verzerrungen und einer weiteren Ungenauigkeit.)

In der Abschätzung des CO₂-Speichers und dessen Veränderung wurden mit vereinfachten Annahmen gearbeitet. So wurde bei der Kategorisierung und Extrapolation der Hochmoore angenommen, dass diese mit der gleichen Ausbildungsform oder Höhenlage die exakt gleiche Mächtigkeit besitzen. Aufgrund der gleichen Bedingungen in der Entstehung und Entwicklung der Hochmoore innerhalb derselben Kategorie, ist das zwar eine denkbare Annahme, kann aber dennoch falsch sein. Da nicht alle Hochmoore untersucht wurden und die Entstehung eines Moores von vielen Faktoren abhängt, konnte nicht ausgeschlossen werden, dass vielleicht alle Hochmoore eine unterschiedliche Mächtigkeit besitzen. Möglicherweise ist das eine oder andere Hochmoor jünger als angenommen oder ein grosser Fels im Torfkörper verfälscht das Volumen. Durch die Einführung von drei Varianten für die Kategorisierung, wurde versucht diese Fehlerquelle zu reduzieren. So ergab es für den CO₂-Speicher drei Resultate, in deren Bereich sich mit grösster Wahrscheinlichkeit der wahre Wert befindet. Für präzisere Resultate ist eine bei weitem aufwändigere und ausführlichere Untersuchung erforderlich, in der alle Hochmoorobjekte genau ausgemessen werden müssten. Dies gilt auch für die Emissionswerte, denn die genauen Emissionen der Hochmoore in der UBE wurden noch nie gemessen. Die in diese Arbeit verwendeten Emissionswerte von Drösler und dem IPCC sind Mittelwerte von vergleichbaren Hochmooren. So könnten bei zukünftigen Arbeiten, die ebenfalls mit

Mittelwerten aus der Literatur rechnen, die effektiven Emissionen von Treibhausgasen über intakten, gestörten und renaturierten Mooren gemessen werden und die unterschiedlichen Vegetationszeiten und klimatischen Bedingungen aufgrund der Höhenlage mit einbeziehen. Die Hochmoore in der UBE verteilen sich auf eine Höhe zwischen 840 und 1'745 Meter über dem Meer. Zwar befindet sich die Schweiz in der gemässigten Zone, aber ab einer Höhenlage von über 1'500 Meter ist das Klima vergleichbar mit der borealen Zone (Meteoblue, 2019). Gemäss den Mittelwerten des IPCC sind die Emissionen in der borealen Zone um ein Viertel höher (IPCC, 2014).

7 Schlussfolgerung

Die Hochmoore der UNESCO Biosphäre Entlebuch speichern in ihrer Torfmasse zwischen 628 und 699 Kilotonnen CO₂-Äquivalente. Mit lediglich einer Fläche von 173 Hektaren ist das verglichen mit andern Ökosystemen eine grosse Menge. Denn ein typisch mitteleuropäischer Wald mit der gleichen Fläche speichert im Vergleich rund 4-mal weniger. Zudem gelten die Hochmoore im Entlebuch mit einer mittleren Mächtigkeit von zwei Meter als klein. Ein Hochmoor mit einer Mächtigkeit von 10 Meter, würde sogar bis zu 20-mal so viel speichern wie ein Wald. In Anbetracht dieser Tatsache, brauchen Hochmoore und Moore zwingend besondere Schutzmassnahmen, um die Freisetzung dieser Treibhausgase zu verhindern und das wertvolle Ökosystem zu erhalten. In der UNESCO Biosphäre Entlebuch betragen diese durch die Hochmoore rund 761 bis 1'688 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr. Der Grund für die Freisetzung ist der überwiegend schlechte Zustand der Hochmoore. Negative Einflüsse durch den Menschen und Klimawandel stören die empfindlichen Ökosysteme. Um dies zu verhindern, benötigen entwässerte Hochmoore nicht nur einen gesetzlichen Schutz als Grundlage, sondern auch eine Renaturierung mit wiedervernässenden Massnahmen. Die Szenarien zeigen dazu deutlich den möglichen Unterschied zwischen einem naturnahen und einem stark gestörten Zustand. Wären nämlich im schlechtesten Fall alle Hochmoore im Entlebuch stark gestört, würden sie 2'403 bis 4'617 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr emittieren. Im besten Fall, wenn sich alle durch Renaturierung in einem naturnahen Zustand befänden, könnten sie 242 bis 311 Tonnen jährlich aufnehmen und speichern. Renaturierungen würden daher nicht nur eine CO₂-Quelle verschliessen, sondern obendrein eine CO₂-Senke erzeugen. Hochmoore sind so auf zweifache Weise von grosser Bedeutung im Kampf gegen die steigenden Treibhausgas-Emissionen und dem Klimawandel. Es ist daher nicht abzustreiten, dass Moore eine wichtige Rolle in der Klimadebatte spielen. Ihren genauen Beitrag zu den globalen Treibhausgas-Emissionen ist aber noch grösstenteils unerforscht. In vielen Bilanzen sind sie noch nicht miteinbezogen. Gemäss dem Pariser Klimaabkommen soll sich das aber bald ändern. Ab 2020 müssen alle Vertragspartner diese Lücke in ihre jeweiligen nationalen Treibhausgasbilanzen füllen. Die Schweiz bezieht die Emissionen der Hochmoore bereits in ihr Treibhausgasinventar mit ein. Allerdings werden für alle Moore nur die Standard-Emissionswerte vom IPCC übernommen. Eine genauere Differenzierung zwischen den intakten und gestörten Hochmooren findet nicht statt. Die vorliegende Arbeit ist vergleichsweise eine grobe Abschätzung des CO₂-Speichers der Hochmoore im Entlebuch. Mit 1,7 Quadratkilometer umfasst diese nur knapp 11% der Hochmoorfläche der Schweiz mit gesamthaft 15 Quadratkilometer. Für präzisere Daten zum schweizweiten CO₂-Speicher und den aktuellen

Emissionen müssten alle 548 Hoch- und Übergangsmoore, sowie 1'070 Flachmoore von nationaler Bedeutung bezüglich ihrer Mächtigkeit, Kohlenstoffgehalts und Emissionswerten untersucht werden.

Nichtsdestotrotz zeigt die ermittelte Senke von 242 bis 311 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Jahr in der UBE und die Schätzung der WSL, dass bis 2050 schweizweit rund eine Million Tonnen eingespart werden könnten, das Potenzial der Renaturierung der Hochmoore. In Anbetracht der «Null-CO₂-Emissionen»-Forderung des IPCC ist die Renaturierung der Hochmoore daher ein geeignetes Mittel für die UBE dieses Ziel zu unterstützen. Ein solcher Ansatz verfolgt die WSL mit dem Projekt «Klimaschutz durch Hochmoorschutz - CO₂-Kompensation durch Hochmoorrenaturierung in der Schweiz». Anhand dieses neuen Finanzierungsinstruments soll die bereits stattfindende Renaturierungstätigkeit der Kantone angekurbelt werden. Die Kompensationsgelder ergänzen die öffentlichen Gelder und erlauben so eine weitergehende oder raschere Regeneration der Hochmoore. Unter Berücksichtigung der obersten 50 Zentimeter Torfschicht, welche der Mineralisierung am stärksten ausgesetzt ist, liegt das Einsparpotenzial einer Hektare Hochmoor im Falle einer Wiedervernässung bei 1'026 Tonnen CO₂-Äquivalente. Der Preis pro Tonne CO₂ liegt je nach Renaturierungsprojekt zwischen 40 und 90 Franken, was vergleichbar ist mit anderen Kompensationsprojekten im Inland (Gubler, 2015). Auf diese Weise können alle zu angemessenen Preisen die Renaturierung der Hochmoore unterstützen und einen wertvollen Beitrag im Kampf gegen den Klimawandel leisten.

Literaturverzeichnis

- Aktion Moorschutz. (21. November 2018). *Hochmoor*. Abgerufen am 18. Januar 2019 von <https://www.aktion-moorschutz.de/moor-infos/was-ist-ein-moor/hochmoor.html>
- Breunig, M. (2018). *Auswirkungen von CO₂ und Möglichkeiten der Reduktion*. Abgerufen am 5. März 2019 von <https://www.energie-experten.ch/de/wissen/detail/auswirkungen-von-co2-und-moeglichkeiten-der-reduktion.html>
- Bundesamt für Naturschutz (BfN). (2017). *Ökosystemleistungen der Moore*. Abgerufen am 5. März 2019 von <https://www.bfn.de/themen/biotop-und-landschaftsschutz/moorschutz/oekosystemleistungen.html>
- Bundesamt für Umwelt (BAFU). (28. August 2018). *Klimawandel: Fragen und Antworten*. Abgerufen am 4. Januar 2019 von <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/klimawandel--fragen-und-antworten.html>
- Bundesamt für Umwelt (BAFU). (27. März 2018). *Moore*. Abgerufen am 18. November 2018 von <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/maassnahmen-zur-erhaltung-und-foerderung-der-biodiversitaet/oekologische-infrastruktur/biotope-von-nationaler-bedeutung/moore.html>
- Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL). (2002). *Moore und Moorschutz in der Schweiz*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- carbon-connect AG. (21. Juli 2017). *Was bzw. wie viel ist eine Tonne CO₂?* Abgerufen am 28. Januar 2019 von <https://www.carbon-connect.ch/de/klimalounge/news-detail/138/was-bzw-wie-viel-ist-eine-tonne-co2/>
- Climate-Data. (2012). *Klimadiagramm Entlebuch und Sörenberg*. Abgerufen am 30. Januar 2019 von <https://de.climate-data.org/europa/schweiz/luzern/soerenberg-153736/>
- Drösler, M. (2011). *Klimaschutz durch Moorschutz in der Praxis*. Braunschweig: Institut für Agrarrelevante Klimaforschung (AK). 8 S.
- Früh, J. (1904). *Die Moore der Schweiz, mit Berücksichtigung der gesamten Moorfrage*. Bern: Stiftung Schnyder von Wartensee.

- Grünig, A. (1986). *Die Hoch- und Übergangsmoore der Schweiz*. Birmensdorf: Eidgenössische Anstalt für das forstliche Versuchswesen.
- Gubler, L. (2015). *Klimaschutz durch Hochmoorschutz*. Abgerufen am 15. Dezember 2018 von <https://www.wsl.ch/de/projekte/klimaschutz-durch-hochmoorschutz.html>
- IPCC. (2014). *2013 Supplement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Wetlands*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change. 40 S.
- Keller, D. (2012). *Aeshna subarctica – Hochmoor-Mosaikjungfer*. Abgerufen am 30. Januar 2019 von <https://www.libellenschutz.ch/arten/item/aeshna-subarctica>
- Klaus, G. (2007). *Zustand und Entwicklung der Moore in der Schweiz. Ergebnisse der Erfolgskontrolle Moorschutz*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Klein, D. (2011). *Wälder und Holzprodukte als Kohlenstoffspeicher*. Abgerufen am 25. Januar 2019 von https://www.waldwissen.net/wald/klima/wandel_co2/lwf_kohlenstoffspeicher_wald/index_DE
- Knaus, F. (2009). *Beurteilung der Hochmoore in der UNESCO Biosphäre Entlebuch*. Schüpfheim: UNESCO Biosphäre Entlebuch.
- Knaus, F. (2018). Vorlesung über Moore. ETH Zürich.
- Kt. Luzern. (1991). *Inventar für Hoch- und Übergangsmoore des Kantons Luzern*. Bern: Bundesamt für Umwelt BAFU.
- Läubli, M. (9. Juli 2018). *Es lebe das Moor!* Abgerufen am 18. Januar 2019 von <https://www.tagesanzeiger.ch/wissen/natur/Es-lebe-das-Moor/story/20804420>
- Meteoblue. (2019). *Klima Glaubenberg*. Abgerufen am 30. Januar 2019 von https://www.meteoblue.com/de/wetter/vorhersage/modelclimate/glaubenberg_schweiz_8436253
- Muntendorf, J. (2011). *Wie Viel Kohlendioxid (CO₂) speichert der Wald bzw. ein Baum* Abgerufen am 5. März 2019 von <https://www.wald.de/wie-viel-kohlendioxid-co2-speichert-der-wald-bzw-ein-baum/#more-399>
- Rahmstorf, S. (29. Juli 2017). *Der globale CO₂-Anstieg: die Fakten und die Bauernfängertricks*. Abgerufen am 8. Januar 2019 von

<https://scilogs.spektrum.de/klimalounge/der-globale-co2-anstieg-die-fakten-und-die-bauernfaengertricks/>

Ramann, E. (2013). *Bodenbildung und Bodeneinteilung: System der Böden*. Berlin: Springer-Verlag.

Speicher, C. (13. November 2018). *Mehr und extremere Hitzetage, lange Trockenperioden: Die neuen Klimaszenarien zeigen, was auf die Schweiz zukommt und wie sie sich dagegen wappnen kann*. Abgerufen am 20. Januar 2019 von <https://www.nzz.ch/wissenschaft/klimaerwaermung-praezisere-klimaszenarien-erleichtern-anpassung-ld.1435331>

Swisstopo. (2018). Von map.geo.admin.ch abgerufen

Temsch, E. M. (2012). *Sphagnum: Torfmoose für Anfänger und rofis*. Abgerufen am 25. Januar 2019 von <https://homepage.univie.ac.at/eva.temsch/moore.html>

Thut, W. (21. Mai 2010). *Moore*. Abgerufen am 5. Januar 2019 von <http://www.hls-dhs-dss.ch/textes/d/D7851.php>

Trepel, M. (2007). *Zur Bedeutung von Mooren in der Klimadebatte*. Bergenhusen: Landesamt für Natur und Umwelt des Landes Schleswig-Holstein. 61 - 71.

UNESCO Biosphäre Entlebuch. (2018). *Was ist eine Biosphäre?* Abgerufen am 20. Januar 2019 von <https://www.biosphaere.ch/de/unesco-biosphaere-a-z/biosphaere-entlebuch-was-ist-das/>

Weertz, J. (2010). *Steinkohle: Inkohlung, Entstehung, fossile Pflanzen und Abbau*. Abgerufen am 20. Januar 2019 von <http://www.debelemniet.nl/itemsteenkoolID.html>

Wünsche, D. (2004). *Genese, Nutzung und Verbreitung von Mooren* (Masterarbeit). München: Grin Verlag.

Anhang

Anhang 1: Liste der Hochmoorobjekte und Angaben zur Aufwertung/Renaturierung.

Nummer	Objektname	Gemeinde	Aufgewertet/renaturiert
257	Zwischen Glaubenberg und Rossalp	Entlebuch / Sarnen	in Planung ab 2019 durch UNESCO Biosphäre Entlebuch
259	Gürmschwald	Entlebuch	nein
294	Ober Lauenberg	Entlebuch	nein
295	Riedboden	Entlebuch	ja
296	Balmoos	Hasle	noch nicht
297	Rosswängenwald	Entlebuch	nein
298	Unter Wasserfallen	Hasle	nein
299	Zwischen Schwand und Gürmschbach	Entlebuch	ja (durch Militär)
301	Hagleren	Flühli	nein, nicht nötig (Pro Natura Grundeigentum)
312	Stächelegg/Ghack	Flühli	nein
313	Salwidili	Flühli	nein, nicht nötig
314	Zopf/Salwiden	Flühli	noch nicht
315	Laubersmadghack	Flühli	ja (Pro Natura Grundeigentum)
316	Türniwald	Flühli	ja
317	Gross Gfäl	Flühli	ja (gutes und langjähriges Beispiel)
318	Husegg-Hurnischwand	Flühli	noch nicht
319	Husegg-Ochsenweid	Flühli	ja
320	Rossweid	Flühli	noch nicht
322	Mittlerschwarzenegg	Flühli	noch nicht
362	Zopf	Flühli	nein, nicht nötig
400	Juchmoos	Hasle	in Planung ab 2019 durch UNESCO Biosphäre Entlebuch
401	Müllerenmösli	Hasle	ja
402	Stächtenmösli	Hasle	Teilobjekt 1: nein Teilobjekt 2: ja (gutes Beispiel)
403	Zwischen Guggenen und Unter Änggenlauenen	Flühli	noch nicht
404	Rüchiwald	Flühli	nein, nicht nötig
405	Zwischen Fürsteinwald und Blattli	Flühli	nein, nicht nötig
407	Fuchserenmoos/Geugelhusenmoos	Entlebuch	noch nicht
408	Mettlimoos	Entlebuch	ja (gutes und langjähriges Beispiel)
409	Östlich Brandchnubel	Flühli /Schüpfheim	ja
410	Tällenmoos	Escholzmatt	noch nicht
411	Wagliseichnubel	Flühli	ja (schönes Beispiel durch armasuisse renaturiert 2018)
432	Zwischen Wagliseichnubel und Ghack	Flühli	noch nicht
435	Fuchseren	Entlebuch	noch nicht
443	Vorderes Steinetti	Flühli	noch nicht
449	Bärsel	Flühli	noch nicht
450	Südlich Ober Saffertberg	Flühli	noch nicht
451	Wagliseiboden	Flühli	ja (Hochmoor wird aber noch gemäht)
452	Cheiserschwand	Flühli	noch nicht
453	Zwischen Schlund und Änzihütten	Flühli	noch nicht
457	Rischli	Flühli	ja
470	Ober Gründli	Flühli	in Planung
471	Äbnistetten	Hasle	noch nicht
473	Guntlishütten	Flühli	Teilobjekt 1: nein, nicht nötig Teilobjekt 2: ja (gutes Beispiel)
938	Südlich Grön	Flühli	noch nicht
939	Tällenmoos im Hilferental	Flühli	noch nicht

Anhang 2: Kategorisierung der Hochmoore in Variante 1 und 2. Gelb gefärbt: nicht untersuchte sekundäre Hochmoore. Orange gefärbt: Ausbildungsform selbst bestimmt.

Kategorisierung der Hochmoore																																																				
Inventarnummer	257	259	294	295	296	297	298	299	301	312	313	314	315	316	317	318	319	320	322	362	400	401	402	403	404	405	407	408	409	410	411	432	435	443	449	450	451	452	453	457	470	471	473	938	939							
Objektname	Zwischen Glaubenberg und Gürmschwald	Gürmschwald	Ober Laubenberg	Riedboden	Balmoos	Rosswängental	Unter Wasserfallen	Zwischen Schwand und Hagleren	Stächelegg/Ghack	Salwidli	Zopf/Salwidli	Laubersmadghack	Tünnliwald	Gross Gfäll	HuseggHurnschwand	HuseggOchsenweid	Rosswald	Mittlerschwarzenegg	Zopf	Juchmoos	Müllerenmösi	Stächtenmösi	Zwischen Guggenen und Rüchiwald	Zwischen Fürsteinwald und Fuchserenmoos/Geugelhusen	Mettliamoos	Östlich Brandchnubel	Tälamoos	Waglseichnubel	Zwischen Waglseichnubel Fuchseren	Vorderes Steinetti	Bärsel	Südlich Ober Saftberg	Waglseiboden	Cheiserschwand	Zwischen Schlund und Rischli	Ober Gründli	Äbnistetten	Guntlihäuten	Südlich Grön	Tälamoos im Hifferental	Total											
Total Hochmoorfläche [ha]	1,4	2,1	0,4	0,4	2,3	0,1	1,8	0,2	18,2	15,4	1,4	7,9	20,8	26,4	10,1	2,6	10,0	1,8	0,5	2,1	1,5	4,1	0,3	0,2	0,2	0,3	7,1	15,1	0,8	2,4	8,1	1,0	1,0	0,3	0,2	0,1	0,5	0,1	0,3	0,1	0,3	0,4	2,3	0,1	0,6	172,9						
Variante 1																																																				
Zentrisches Hochmoor																																																				
Decken- und Kuppenmoor	x					x																																								x						
Sattelmooor											x								x				x	x																												
Hanghochmoor		x					x		x	x		x	x	x	x	x	x		x				x					x	x																	x	x	x				
Hochlagenhochmoor																																																				
sekundäres Hochmoor			x	x	x			x													x	x	x				x	x																				x				
Variante 2																																																				
Höhenlage [m]	1520	1460	1500	1530	970	1400	1565	1350	1745	1300	1330	1360	1345	1460	1470	1395	1385	1440	1485	1340	1040	1035	1030	1440	1640	1435	1095	1020	1225	840	1385	1415	1090	1380	1395	1330	1280	1300	1385	1205	1240	1215	1320	1500	1255							
bis 1000 m					x																																															
1000 - 1200 m																																																				
ab 1200 m	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				x	x	x																										

Anhang 3: Messungen der Feldarbeit

Feldarbeit Messungen Mächtigkeit																					
Datum	Nummer	Objektname	Genese	Höhenlage	Transsekt	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Mittelwert [m]
09.10.2018	296	Balmoos	Sekundäres Hochmoor	970	1. Transsekt	1,40	4,00	4,50	4,50	3,75	3,50	2,50	2,25								3,3
09.10.2018	296	Balmoos	Sekundäres Hochmoor	970	2. Transsekt	1,25	2,50	3,50	3,80	2,80	2,00	3,00									2,7
09.10.2018	296	Balmoos	Sekundäres Hochmoor	970	3. Transsekt	1,50	2,50	4,00	2,00	1,00											2,2
20.10.2018	411	Wagliseichnubel	Hanghochmoor	1 385	1. Transsekt	1,08	2,00	3,70	3,70	2,93	1,60										2,5
20.10.2018	411	Wagliseichnubel	Hanghochmoor	1 385	2. Transsekt	2,68	2,15	3,58	2,68												2,8
20.10.2018	411	Wagliseichnubel	Hanghochmoor	1 385	1. Transsekt	0,56	1,08	0,82	0,82	0,82	1,35	0,56	0,28	1,08	2,28	1,88	0,82	1,62			1,1
20.10.2018	411	Wagliseichnubel	Hanghochmoor	1 385	2. Transsekt	0,95	2,15	0,28	3,19	1,62	0,56	1,48	1,08	1,62							1,4
20.10.2018	362	Zopf	Hanghochmoor	1 340	1. Transsekt	0,28	0,69	0,82	0,82	0,82	0,56	0,82									0,7
20.10.2018	362	Zopf	Hanghochmoor	1 340	2. Transsekt	0,69	1,08	0,95	0,82	0,56											0,8
03.11.2018	313	Salwidi	Sattelhochmoor	1330	1. Transsekt	1,07	1,61	1,88	2,14	2,14	1,88	1,61	1,61								1,7
03.11.2018	313	Salwidi	Sattelhochmoor	1330	2. Transsekt	1,88	1,88	2,14	2,14	1,88	2,14	1,61	1,34								1,9
03.11.2018	314	Zopf/Salwiden	Hanghochmoor	1360	1. Transsekt	1,88	2,14	2,41	2,41	2,68	2,14	2,14									2,3
03.11.2018	314	Zopf/Salwiden	Hanghochmoor	1360	2. Transsekt	1,61	1,88	1,88	2,41	2,41	2,14	2,14									2,1
03.11.2018	411	Wagliseichnubel	Hanghochmoor	1 385	1. Transsekt	1,61	1,34	1,34	1,34	1,61	1,34	1,07									1,4
03.11.2018	411	Wagliseichnubel	Hanghochmoor	1 385	2. Transsekt	1,07	1,07	1,61	1,34	1,34	1,61	1,61									1,4
03.11.2018	411	Wagliseichnubel	Hanghochmoor	1 385	3. Transsekt	1,61	1,88	1,88	2,14	1,61											1,8
15.12.2018	408	Mettelimoos	Sekundäres Hochmoor	1 020	1. Transsekt	0,80	1,07	1,07	1,34	1,61	1,07	2,68	2,95	3,22	2,68	2,68	2,95	1,88			2,0
15.12.2018	408	Mettelimoos	Sekundäres Hochmoor	1 020	2. Transsekt	0,54	1,07	1,34	2,95	3,22	2,95	2,68	2,68	2,68	2,68	2,68	2,14	3,22	1,61	1,07	2,2
15.12.2018	407	Fuchserenmoos/G.	Hanghochmoor	1 095	1. Transsekt	1,61	2,14	2,14	1,34												1,8
15.12.2018	407	Fuchserenmoos/G.	Hanghochmoor	1 095	2. Transsekt	1,61	2,14	2,41	2,41	2,14	1,34										2,0
15.12.2018	407	Fuchserenmoos/G.	Sekundäres Hochmoor	1 095	1. Transsekt	0,8	1,07	2,14	2,41	2,41	2,14	2,14	1,34	1,07	1,07	0,54					1,6
15.12.2018	407	Fuchserenmoos/G.	Sekundäres Hochmoor	1 095	2. Transsekt	0,54	1,07	1,88	1,88	0,8											1,2
15.12.2018	410	Tällenmoos	Sekundäres Hochmoor	840	1. Transsekt	2,14	2,95	2,14	2,14	2,14	2,41	3,22	3,48	3,22	3,22	2,14					2,7
15.12.2018	410	Tällenmoos	Sekundäres Hochmoor	840	2. Transsekt	1,88	3,22	3,48	3,75	4,29	4,56										3,5

Anhang 4: Kategorisierung der Hochmoore in Variante 1 und 2

Objekt		Variante 1	Variante 2
Nummer	Objektname	Ausbildungsform/Genese	Höhenlage
257	Zwischen Glaubenberg und Rossalp	Deckenmoor	ab 1200
259	Gürmschwald	Hanghochmoor	ab 1200
294	Ober Lauenberg	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
295	Riedboden	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
296	Balmoos	Sekunäres Hochmoor	bis 1000
297	Rosswängenwald	Deckenmoor	ab 1200
298	Unter Wasserfallen	Hanghochmoor	ab 1200
299	Zwischen Schwand und Gürmschbach	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
301	Hagleren	Hanghochmoor	ab 1200
312	Stächelegg/Ghack	Hanghochmoor	ab 1200
313	Salwidili	Sattelhochmoor	ab 1200
314	Zopf/Salwiden	Hanghochmoor	ab 1200
315	Laubersmadghack	Hanghochmoor	ab 1200
316	Türnlwald	Hanghochmoor	ab 1200
317	Gross Gfäl	Hanghochmoor	ab 1200
318	Husegg-Hurnischwand	Hanghochmoor	ab 1200
319	Husegg-Ochsenweid	Hanghochmoor	ab 1200
320	Rossweid	Hanghochmoor	ab 1200
322	Mittlerschwarzenegg	Sattelhochmoor	ab 1200
362	Zopf	Hanghochmoor	ab 1200
400	Juchmoos	Sekunäres Hochmoor	1000 bis 1200
401	Müllerenmösi	Sekunäres Hochmoor	1000 bis 1200
402	Stächtenmösi	Sekunäres Hochmoor	1000 bis 1200
403	Zwischen Guggenen und Unter Änggenlauenen	Hanghochmoor	ab 1200
404	Rüchiwald	Sattelhochmoor	ab 1200
405	Zwischen Fürsteinwald und Blattli	Sattelhochmoor	ab 1200
407	Fuchserenmoos/Geugelhusenmoos	Sekunäres Hochmoor	1000 bis 1200
408	Mettlimoos	Sekunäres Hochmoor	1000 bis 1200
409	Östlich Brandchnubel	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
410	Tällenmoos	Sekunäres Hochmoor	bis 1000
411	Wagliseichnubel	Hanghochmoor	ab 1200
432	Zwischen Wagliseichnubel und Ghack	Hanghochmoor	ab 1200
435	Fuchseren	Sekunäres Hochmoor	1000 bis 1200
443	Vorderes Steinetti	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
449	Bärsel	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
450	Südlich Ober Saffertberg	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
451	Wagliseiboden	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
452	Cheiserschwand	Hanghochmoor	ab 1200
453	Zwischen Schlund und Änzihütten	Hanghochmoor	ab 1200
457	Rischli	Sekunäres Hochmoor	ab 1200
470	Ober Gründli	Hanghochmoor	ab 1200
471	Äbnistetten	Hanghochmoor	ab 1200
473	Guntlishütten	Hanghochmoor	ab 1200
938	Südlich Grön	Deckenmoor	ab 1200
939	Tällenmoos im Hilferental	Sekunäres Hochmoor	ab 1200

Anhang 5: Fläche, Mächtigkeit und Volumen der Hochmoore

Grösse								
Nummer	Fläche [ha]	Fläche [m ²]	Variante 1		Variante 2		Variante 3	
			Tiefe [m]	Volumen [m ³]	Tiefe [m]	Volumen [m ³]	Tiefe [m]	Volumen [m ³]
257	1,40	14 000	1,0	14 000	1,7	23 484	2,0	27 433
259	2,14	21 400	1,7	36 228	1,7	35 898	2,0	41 933
294	0,35	3 500	2,0	6 858	1,7	5 871	2,0	6 858
295	0,38	3 800	2,0	7 446	1,7	6 374	2,0	7 446
296	2,31	23 100	2,7	63 085	2,7	63 085	2,7	63 085
297	0,09	900	1,0	900	1,7	1 510	2,0	1 764
298	1,84	18 400	1,7	31 150	1,7	30 865	2,0	36 055
299	0,16	1 600	2,0	3 135	1,7	2 684	2,0	3 135
301	18,23	182 300	1,7	308 619	1,7	305 800	2,0	357 218
312	15,36	153 600	1,7	260 032	1,7	257 657	2,0	300 980
313	1,39	13 900	1,8	25 145	1,8	25 145	1,8	25 145
314	7,85	78 500	2,2	169 807	2,2	169 807	2,2	169 807
315	20,78	207 800	1,7	351 788	1,7	348 575	2,0	407 185
316	26,37	263 700	1,7	446 422	1,7	442 345	2,0	516 722
317	10,13	101 300	1,7	171 492	1,7	169 926	2,0	198 498
318	2,61	26 100	1,7	44 185	1,7	43 782	2,0	51 143
319	9,99	99 900	1,7	169 122	1,7	167 578	2,0	195 755
320	1,77	17 700	1,7	29 965	1,7	29 691	2,0	34 683
322	0,52	5 200	1,8	9 407	1,7	8 723	2,0	10 189
362	2,14	21 400	0,8	16 082	0,8	16 082	0,8	16 082
400	1,50	15 000	2,0	29 393	1,8	27 110	2,0	29 393
401	4,07	40 700	2,0	79 752	1,8	73 559	2,0	79 752
402	0,27	2 700	2,0	5 291	1,8	4 880	2,0	5 291
403	0,16	1 600	1,7	2 709	1,7	2 684	2,0	3 135
404	0,19	1 900	1,8	3 437	1,7	3 187	2,0	3 723
405	0,25	2 500	1,8	4 523	1,7	4 194	2,0	4 899
407	7,05	70 500	1,7	116 520	1,7	116 520	1,7	116 520
408	15,12	151 200	2,1	320 017	2,1	320 017	2,1	320 017
409	0,75	7 500	2,0	14 696	1,7	12 581	2,0	14 696
410	2,44	24 400	3,1	75 448	3,1	75 448	3,1	75 448
411	8,07	80 700	1,8	142 488	1,8	142 488	1,8	142 488
432	1,00	10 000	1,7	16 929	1,7	16 775	2,0	19 595
435	1,01	10 100	2,0	19 791	1,8	18 254	2,0	19 791
443	0,25	2 500	2,0	4 899	1,7	4 194	2,0	4 899
449	0,16	1 600	2,0	3 135	1,7	2 684	2,0	3 135
450	0,06	600	2,0	1 176	1,7	1 006	2,0	1 176
451	0,53	5 300	2,0	10 385	1,7	8 891	2,0	10 385
452	0,07	700	1,7	1 185	1,7	1 174	2,0	1 372
453	0,25	2 500	1,7	4 232	1,7	4 194	2,0	4 899
457	0,14	1 400	2,0	2 743	1,7	2 348	2,0	2 743
470	0,31	3 100	1,7	5 248	1,7	5 200	2,0	6 074
471	0,41	4 100	1,7	6 941	1,7	6 878	2,0	8 034
473	2,34	23 400	1,7	39 614	1,7	39 252	2,0	45 852
938	0,08	800	1,0	800	1,7	1 342	2,0	1 568
939	0,62	6 200	2,0	12 149	1,7	10 400	2,0	12 149

Anhang 6: Speicher der Hochmoore in CO₂-Äquivalente, Torf und organischen Kohlenstoff

Speicher									
Nummer	Variante 1			Variante 2			Variante 3		
	Masse Torf [t]	org. C [t]	CO ₂ -Äquivalente [t]	Masse Torf [t]	org. C [t]	CO ₂ -Äquivalente [t]	Masse Torf [t]	org. C [t]	CO ₂ -Äquivalente [t]
257	1 410	784	2 873	2 365	1 315	4 819	2 763	1 536	5 629
259	3 649	2 029	7 434	3 616	2 010	7 366	4 224	2 348	8 605
294	691	384	1 407	591	329	1 205	691	384	1 407
295	750	417	1 528	642	357	1 308	750	417	1 528
296	6 354	3 533	12 945	6 354	3 533	12 945	6 354	3 533	12 945
297	91	50	185	152	85	310	178	99	362
298	3 137	1 744	6 392	3 109	1 728	6 334	3 631	2 019	7 398
299	316	176	643	270	150	551	316	176	643
301	31 084	17 283	63 329	30 800	17 125	62 750	35 979	20 004	73 301
312	26 190	14 562	53 359	25 951	14 429	52 871	30 315	16 855	61 761
313	2 533	1 408	5 160	2 533	1 408	5 160	2 533	1 408	5 160
314	17 103	9 509	34 844	17 103	9 509	34 844	17 103	9 509	34 844
315	35 432	19 700	72 187	35 108	19 520	71 528	41 011	22 802	83 554
316	44 963	25 000	91 606	44 553	24 771	90 769	52 044	28 936	106 031
317	17 273	9 604	35 190	17 115	9 516	34 869	19 993	11 116	40 732
318	4 450	2 474	9 067	4 410	2 452	8 984	5 151	2 864	10 495
319	17 034	9 471	34 704	16 878	9 384	34 387	19 716	10 962	40 169
320	3 018	1 678	6 149	2 990	1 663	6 093	3 493	1 942	7 117
322	947	527	1 930	879	488	1 790	1 026	571	2 091
362	1 620	901	3 300	1 620	901	3 300	1 620	901	3 300
400	2 960	1 646	6 031	2 731	1 518	5 563	2 960	1 646	6 031
401	8 033	4 466	16 365	7 409	4 119	15 094	8 033	4 466	16 365
402	533	296	1 086	491	273	1 001	533	296	1 086
403	273	152	556	270	150	551	316	176	643
404	346	192	705	321	178	654	375	208	764
405	456	253	928	422	235	861	493	274	1 005
407	11 736	6 525	23 910	11 736	6 525	23 910	11 736	6 525	23 910
408	32 232	17 921	65 667	12 212	17 921	65 667	32 232	17 921	65 667
409	1 480	823	3 016	1 267	705	2 582	1 480	823	3 016
410	7 599	4 225	15 482	7 599	4 225	15 482	7 599	4 225	15 482
411	14 351	7 979	29 239	14 351	7 979	29 239	14 351	7 979	29 239
432	1 705	948	3 474	1 690	939	3 442	1 974	1 097	4 021
435	1 993	1 108	4 061	1 839	1 022	3 746	1 993	1 108	4 061
443	493	274	1 005	422	235	861	493	274	1 005
449	316	176	643	270	150	551	316	176	643
450	118	66	241	101	56	207	118	66	241
451	1 046	582	2 131	895	498	1 824	1 046	582	2 131
452	119	66	243	118	66	241	138	77	281
453	426	237	868	422	235	861	493	274	1 005
457	276	154	563	237	132	482	276	154	563
470	529	294	1 077	524	291	1 067	612	340	1 246
471	699	389	1 424	693	385	1 411	809	450	1 649
473	3 990	2 218	8 129	3 953	2 198	8 055	4 618	2 568	9 409
938	81	45	164	135	75	275	158	88	322
939	1 224	680	2 493	1 048	582	2 134	1 224	680	2 493

Anhang 7: Zustand der Hochmoore und Emissionen (Variante Drösler)

Nummer	Zustand			Emissionen Variante Drösler				Szenarien Variante Drösler	
	Zustand Knaus	renaturiert	Zustand Drösler/IPCC	Emissionen CO ₂ -Äquivalente [t]	fehlende Senke	Verlust org. C [t]	Verlust Torf [t]	Szenario «renaturiert» Emissionen CO ₂ -Äquivalente [t]	Szenario «stark gestört» Emissionen CO ₂ -Äquivalente [t]
257	intakt		naturnahe/renaturiert Min	-2,52		-0,69	-1,24	-2,52	16,94
259	gestört		trocken Mitt	20,5	-3,85	5,60	10,08	-3,85	25,89
294	gestört		trocken Mitt	3,4	-0,63	0,92	1,65	-0,63	4,24
295	leicht gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Min	-0,68		-0,19	-0,34	-0,68	4,60
296	gestört		trocken Mitt	22,2	-4,16	6,05	10,88	-4,16	27,95
297	keine Beurteilung	primär	naturnahe/renaturiert Min	-0,16		-0,04	-0,08	-0,16	1,09
298	keine Beurteilung	primär	naturnahe/renaturiert Min	-3,31		-0,90	-1,63	-3,31	22,26
299	leicht gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Min	-0,29		-0,08	-0,14	-0,29	1,94
301	leicht gestört		trocken Min	96,6	-32,81	26,35	47,42	-32,81	220,58
312	gestört		trocken Mitt	147,5	-27,65	40,22	72,38	-27,65	185,86
313	gestört		trocken Mitt	13,3	-2,50	3,64	6,55	-2,50	16,82
314	gestört		trocken Mitt	75,4	-14,13	20,55	36,99	-14,13	94,99
315	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	2,08	-37,40	0,57	1,02	-37,40	251,44
316	leicht gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Min	-47,47		-12,95	-23,30	-47,47	319,08
317	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	1,01	-18,23	0,28	0,50	-18,23	122,57
318	leicht gestört		trocken Min	13,8	-4,70	3,77	6,79	-4,70	31,58
319	(leicht) gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Min	-17,98		-4,90	-8,83	-17,98	120,88
320	gestört		trocken Mitt	17,0	-3,19	4,63	8,34	-3,19	21,42
322	gestört		trocken Mitt	5,0	-0,94	1,36	2,45	-0,94	6,29
362	keine Beurteilung	sekundär	trocken Mitt	20,5	-3,85	5,60	10,08	-3,85	25,89
400	gestört		trocken Mitt	14,4	-2,70	3,93	7,07	-2,70	18,15
401	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	0,41	-7,33	0,11	0,20	-7,33	49,25
402	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	0,03	-0,49	0,01	0,01	-0,49	3,27
403	intakt		naturnahe/renaturiert Min	-0,29		-0,08	-0,14	-0,29	1,94
404	intakt		naturnahe/renaturiert Min	-0,34		-0,09	0,17	-0,34	2,30
405	leicht gestört		trocken Min	1,3	-0,45	0,36	0,65	-0,45	3,03
407	gestört		trocken Mitt	67,7	-12,69	18,46	33,22	-12,69	85,31
408	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	1,51	-27,22	0,41	0,74	-27,22	182,95
409	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	0,08	-1,35	0,02	0,04	-1,35	9,08
410	(leicht) gestört		trocken Min	12,9	-4,39	3,53	6,35	-4,39	29,52
411	(stark) gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Max	23,40	-14,53	6,38	11,49	-14,53	97,65
432	leicht gestört		trocken Min	5,3	-1,80	1,45	2,60	-1,80	12,10
435	gestört		trocken Mitt	9,7	-1,82	2,64	4,76	-1,82	12,22
443	stark gestört		trocken Max	3,0	-0,45	0,83	1,48	-0,45	3,03
449	leicht gestört		trocken Min	0,8	-0,29	0,23	0,42	-0,29	1,94
450	leicht gestört		trocken Min	0,3	-0,11	0,09	0,16	-0,11	0,73
451	stark gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Max	1,54	-0,95	0,42	0,75	-0,95	6,41
452	gestört		trocken Mitt	0,7	-0,13	0,18	0,33	-0,13	0,85
453	leicht gestört		trocken Min	1,3	-0,45	0,36	0,65	-0,45	3,03
457	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	0,01	-0,25	0,00	0,01	-0,25	1,69
470	keine Beurteilung	sekundär	trocken Mitt	3,0	-0,56	0,81	1,46	-0,56	3,75
471	gestört		trocken Mitt	3,9	-0,74	1,07	1,93	-0,74	4,96
473	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	0,23	-4,21	0,06	0,11	-4,21	28,31
938	leicht gestört		trocken Min	0,4	-0,14	0,12	0,21	-0,14	0,97
939	gestört		trocken Mitt	6,0	-1,12	1,62	2,92	-1,12	7,50

Anhang 8: Zustand der Hochmoore und Emissionen (Variante IPCC)

Nummer	Zustand			Emissionen Variante IPCC				Szenarien Variante IPCC	
	Zustand	renaturiert	Variante Drösler/IPCC	Emissionen CO ₂ -Äquivalente [t]	fehlende Senke	Verlust org. C [t]	Verlust Torf [t]	Szenario «renaturiert» Emissionen CO ₂ -Äquivalente [t]	Szenario «stark gestört» Emissionen CO ₂ -Äquivalente [t]
257	intakt		naturnahe/renaturiert Min	-1,96		-0,53	-0,96	-1,96	35,42
259	gestört		trocken Mitt	41,59	-3,00	11,34	20,41	-3,00	54,14
294	gestört		trocken Mitt	6,80	-0,49	1,86	3,34	-0,49	8,86
295	leicht gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Min	-0,53		-0,15	0,26	-0,53	9,61
296	gestört		trocken Mitt	44,89	-3,23	12,24	22,03	-3,23	58,44
297	keine Beurteilung	primär	naturnahe/renaturiert Min	-0,13		-0,03	-0,06	-0,13	2,28
298	keine Beurteilung	primär	naturnahe/renaturiert Min	-2,58		-0,70	-1,26	-2,58	46,55
299	leicht gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Min	-0,22		-0,06	-0,11	-0,22	4,05
301	leicht gestört		trocken Min	247,32	-25,52	67,45	121,39	-25,52	461,22
312	gestört		trocken Mitt	298,50	-21,50	81,41	146,51	-21,50	388,61
313	gestört		trocken Mitt	27,01	-1,95	7,37	13,26	-1,95	35,17
314	gestört		trocken Mitt	152,55	-10,99	41,61	74,88	-10,99	198,61
315	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	72,73	-29,09	19,84	35,7	-29,09	525,73
316	leicht gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Min	36,92		-10,07	-18,12	-36,92	667,16
317	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	35,46	-14,18	9,67	17,40	-14,18	256,29
318	leicht gestört		trocken Min	35,41	-3,65	9,66	17,38	-3,65	66,03
319	(leicht) gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Min	-13,99		-3,81	-6,86	-13,99	252,75
320	gestört		trocken Mitt	34,40	-2,48	9,38	16,88	-2,48	44,78
322	gestört		trocken Mitt	10,11	-0,73	2,76	4,96	-0,73	13,16
362	keine Beurteilung	sekundär	trocken Mitt	41,59	-3,00	11,34	20,41	-3,00	54,14
400	gestört		trocken Mitt	29,15	-2,10	7,95	14,31	-2,10	37,95
401	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	14,25	-5,70	3,89	6,99	-5,70	102,97
402	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	0,95	-0,38	0,26	0,46	-0,38	6,83
403	intakt		naturnahe/renaturiert Min	-0,22		-0,06	-0,11	-0,22	4,05
404	intakt		naturnahe/renaturiert Min	-0,27		-0,07	-0,13	-0,27	4,81
405	leicht gestört		trocken Min	3,39	-0,35	0,93	1,66	-0,35	6,33
407	gestört		trocken Mitt	137,01	-9,87	37,37	67,25	-9,87	178,37
408	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	52,92	-21,17	14,43	25,98	-21,17	382,54
409	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	2,63	-1,05	0,72	1,29	-1,05	18,98
410	(leicht) gestört		trocken Min	33,10	-3,42	9,03	16,25	-3,42	61,73
411	(stark) gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Max	145,26	-11,30	39,62	71,30	-11,30	204,17
432	leicht gestört		trocken Min	13,57	-1,40	3,70	6,66	-1,40	25,30
435	gestört		trocken Mitt	19,63	-1,41	5,35	9,63	-1,41	25,55
443	stark gestört		trocken Max	6,33	-0,35	1,73	3,10	-0,35	6,33
449	leicht gestört		trocken Min	2,17	-0,22	0,59	1,07	-0,22	4,05
450	leicht gestört		trocken Min	0,81	-0,08	0,22	0,40	-0,08	1,52
451	stark gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Max	9,54	-0,74	2,60	4,68	-0,74	13,41
452	gestört		trocken Mitt	1,36	-0,10	0,37	0,67	-0,10	1,77
453	leicht gestört		trocken Min	3,39	-0,35	0,93	1,66	-0,35	6,33
457	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	0,49	-0,20	0,13	0,24	-0,20	3,54
470	keine Beurteilung	sekundär	trocken Mitt	6,02	-0,43	1,64	2,96	-0,43	7,84
471	gestört		trocken Mitt	7,97	-0,57	2,17	3,91	-0,57	10,37
473	gestört	renaturiert	naturnahe/renaturiert Mitt	8,19	-3,28	2,23	4,02	-3,28	59,20
938	leicht gestört		trocken Min	1,09	-0,11	0,30	0,53	-0,11	2,02
939	gestört		trocken Mitt	12,05	-0,87	3,29	5,91	-0,87	15,69



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):

Abschätzung des CO₂-Speichers der Hochmoore
in der UNESCO Biosphäre Entlebuch

Verfasst von (in Druckschrift):

Bei Gruppenarbeiten sind die Namen aller Verfasserinnen und Verfasser erforderlich.

Name(n):

Dettwiler

Vorname(n):

Mike

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

Arisdorf, 3. Feb. 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.