

Schlussbericht

Rock heritage, soil formation and practical implications for the Three Lakes Region (RESTORE)

Herkunft und Eigenschaften von Moränen-Bodenmaterial im Drei-Seen-Land und dessen Eignung zur Bodenverbesserung

Markus Egli, Ciriaco McMackin, Geographisches Institut, Universität Zürich

2026

Zusammenfassung

Als Folge der Entwässerung und landwirtschaftlichen Nutzung haben sich die organischen Böden im Seeland teilweise sehr stark abgesenkt und die Bodenfruchtbarkeit ist gefährdet. Seit mehreren Jahrzehnten werden lokal Massnahmen getroffen, die von Tiefpflügen bis zu Aufschüttungen reichen. Der Einfluss von Aufschüttungen auf die Bodenqualität und im speziellen auf die darunterliegenden organischen Böden bzw. Torf ist nur wenig erforscht. Es wird vermutet, dass eine Aufschüttung den Abbau organischer Substanz der überschütteten Böden stoppt oder zumindest stark reduziert. Folglich gingen wir folgenden Fragen nach: 1) Welche lokalen Bodenmaterialien eignen sich für eine Aufschüttung und somit künstliche Böden besser und welche weniger? 2) Inwieweit vermindern Aufschüttungen den Abbau des darunterliegenden organischen Bodens bzw. Torfs oder läuft der Abbau ungebremst weiter?

Um diese Fragen zu beantworten untersuchten wir 10 landwirtschaftliche Standorte (ursprünglicher Boden und Aufschüttung) im Seeland, 10 natürliche Bodenprofile in 5 Steinbruchstandorten (Kallnach, Finsterhennen, Müntschemier, Cornaux, Ménières) und 166 Ackerstandorte um einerseits die Beschaffenheit von Materialien, die potentiell für Aufschüttungen in Frage kommen, zu untersuchen und andererseits um die Abbauprozesse und Bindungseigenschaften des organischen Kohlenstoffs zu charakterisieren und quantifizieren. Wir konnten zwei Haupttypen an Materialien unterscheiden: Materialien, die reich an Karbonat sind, und solche die mehr Ton enthalten bzw. von Tonverlagerung betroffen sind und einen hohen Silikatanteil aufwiesen. Karbonatreiche Böden enthalten entschieden weniger Grobporen als silikatreiches Material und sind allfälliger auf Verdichtung. Silikatreiches Material hat meist einen recht hohen Sand-Anteil. Folglich ist der Einsatz von karbonatreichem Material mit Nachfolgeproblemen verbunden (z.B. Verdichtung). Die CO₂-Emissionen aus aufgeschütteten Böden sind meist etwas geringer (ca. -25 %) als aus nicht verfüllten Böden. Die ¹⁴C Messungen zeigten, dass zum Teil sehr alter Kohlenstoff aus Moorböden veratmet wird. Eine Aufschüttung scheint den Torfabbau bzw. den Abbau organischer Materie von ehemaligen

Moorböden zu reduzieren (mind. um einen Faktor 2). Der Abbau der organischen Materie des überschütteten Bodens wird aber nicht vollständig gestoppt. Mit einer Aufschüttung scheint zwar die pflanzennutzbare Gründigkeit erhöht zu werden. 40% der Fälle haben am Schluss aber immer noch eine Gründigkeit, die zu gering für eine Fruchtfolgefläche ist. Die Aggregatbildung, die wichtig für die Struktur eines gesunden Bodens ist, schreitet in den aufgeschütteten und somit künstlichen Böden nur sehr langsam voran. Eine Gefügebildung im Boden lässt sich auch nach 50 Jahren einer Aufschüttung praktisch kaum nachweisen – höchstens ansatzweise. Das Material bleibt schlecht durchmischt, da sich die Population der Regenwürmer, die die Aggregatbildung fördern, vermutlich noch nicht richtig etabliert hat.

1. Einleitung

Die Ertragssicherheit ackerbaulich genutzter Böden im Drei-Seen-Land (und ähnlicher Gebiete) ist verbreitet gefährdet und soll mit lokalen Terrainanhebungen wieder gestärkt werden. Durch den Abbau organischer Substanz (als Folge der zwei Juragewässerkorrekturen) kommen immer mehr die heterogenen Geländebeziehungen zum Vorschein (Wasseransammlungen).

Die Böden im Seeland sind im Verlauf der letzten 100 bis 150 Jahren sehr stark geschrumpft. Als Folge der Absenkungen und Verringerung der Bodenfruchtbarkeit werden seit mehreren Jahrzehnten lokal Massnahmen getroffen, die von Tiefpflügen bis zu Aufschüttungen reichen. Normalerweise wird mit Bodenverbesserungen versucht, die Ertragsfähigkeit des Bodens zu erhöhen oder dessen Bewirtschaftung zu erleichtern, um somit konkurrenzfähig zu bleiben.

Aufschüttungen können, falls das Material fachgerecht eingebracht wird, eine tatsächliche Verbesserung für die agrarische Nutzung bewirken. Dabei muss das zugefügte Bodenmaterial über günstige Eigenschaften verfügen (nicht zu tonig und lehmig).

Organische Böden enthalten sehr grosse Mengen an Kohlenstoff, welcher durch Drainage und die landwirtschaftliche Nutzung verloren geht (Wüst-Galley et al., 2020; Egli et al., 2021). Das Problem ist auf nationaler Ebene erkannt und Massnahmen sind geplant ("B-06 Erstellen und Implementieren eines Leitfadens zum Umgang mit Moorböden"; BLW et al., 2025; Schweizerischer Bundesrat, 2020, 2022). In diesem Zusammenhang wird explizit das Berner Seeland erwähnt und das Projekt Bodenverbesserung (BOVE), das verschiedene Methoden für Bodenaufwertungen für degradierte, organische Böden im Feld überprüft und testet.

In früheren Arbeiten zeigten wir auf (Egli et al., 2020; Rösli & Egli, 2024), wie sich die räumliche Verteilung des Abbaus an organischer Materie mit einhergehenden Bodenabsenkungen im Drei-Seen-Land präsentiert. Vermutet wird nun, dass eine Aufschüttung den Abbau der organischen Substanz der darunterliegenden organischen Böden oder Torf stoppt oder zumindest reduziert.

Folglich gingen wir zwei hauptsächlichen Fragen in unseren Arbeiten nach:

1) Welche lokalen Bodenmaterialien oder geologisches Substrat eignen sich für eine Aufschüttung und somit künstliche Böden besser und welche weniger?

2) Inwieweit vermindern Aufschüttungen tatsächlich den Abbau des darunterliegenden organischen Bodens oder Torfs (bzw. was davon noch übriggeblieben ist) oder läuft der Abbau eventuell ungebremst weiter?

2. Untersuchungsstandorte

Mehrheitlich wird das Material, welches für Aufschüttungen benötigt wird, aus der direkt umliegenden benutzt. Folglich wurde diese Region im Hinblick auf die Materialqualität genauer untersucht.

a) Bodenprofile:

Kies- und andere Abbaugruben eignen sich am besten, um sich einen Überblick über Böden zu verschaffen und Bodenprofile detailliert studieren zu können. Wir haben 10 Profile (Abb. 1) folgender Gruben beprobt:

- Kallnach, Kt. BE (Hurni Kies- und Betonwerk AG)
- Finsterhennen, Kt BE (Vigier Beton Nordwest)
- Müntschemier, Kt. BE (Gugger Kies und Immobilien AG)
- Cornaux, Kt. NE (Juracime S.A.)
- Ménières, Kt. FR (Bersier Gravière de Ménières SA)

b) Ackerstandorte:

Oberbodenproben von 166 Ackerstandorte wurden entnommen. Die Standorte (Bodenprofile, Ackerstandorte, Aufschüttungen) sind in Abbildung 1 dargestellt.

Um die zweite Frage zu beantworten, untersuchten wir die Eigenschaften und biogeochemischen Stoffflüsse von Aufschüttungen genauer.

c) 10 Aufschüttungen wurden mit direkt daneben liegenden unbelassenen Böden verglichen (Tabelle 1 und Abb. 2).

d) An 3 Standorten (Lindergut, Underi Site und Rimmerzmatte) wurden detaillierte CO₂-Messungen auf Aufschüttungen und dem direkt anliegenden ursprünglichen Standort durchgeführt.

Tabelle 1. Untersuchungsstandorte mit Aufschüttungen

Gemeinde	Ortsname	Koordinaten	Amelio-Jahr	Material	Art der Aufschüttung
Hagneck	Stich	2581415/1211540	ca. 1990	Sand	Korrektter Aufbau
Kallnach	Undermoos	2582583/1207833	ca. 2008	Moräne	C Material
Ins	Stälze	2574430/1204958	ca. 2012	Moräne	C Material
Ins	Lindergut	2574185/1203195	ca. 1995	Sediments	BC Material
Gals	Wideteile	2570920/1209796	1975	Moräne	C Material
Ins	Jeans Möösli	2573161/1205796	2021	Moräne	C Material
Finsterhennen	Underi Site	2582270/1208290	2013	Moräne	BC Material
Kerzers	Vauthier Moos	2579170/1204170	2021	Moräne	Korrektter Aufbau
Gampelen	Rimmerzmatte	2572652/1206890	1971	Sand	Korrektter Aufbau
Kallnach	Niederriedmoos	2581932/1206350	2021	Moräne	Korrektter Aufbau

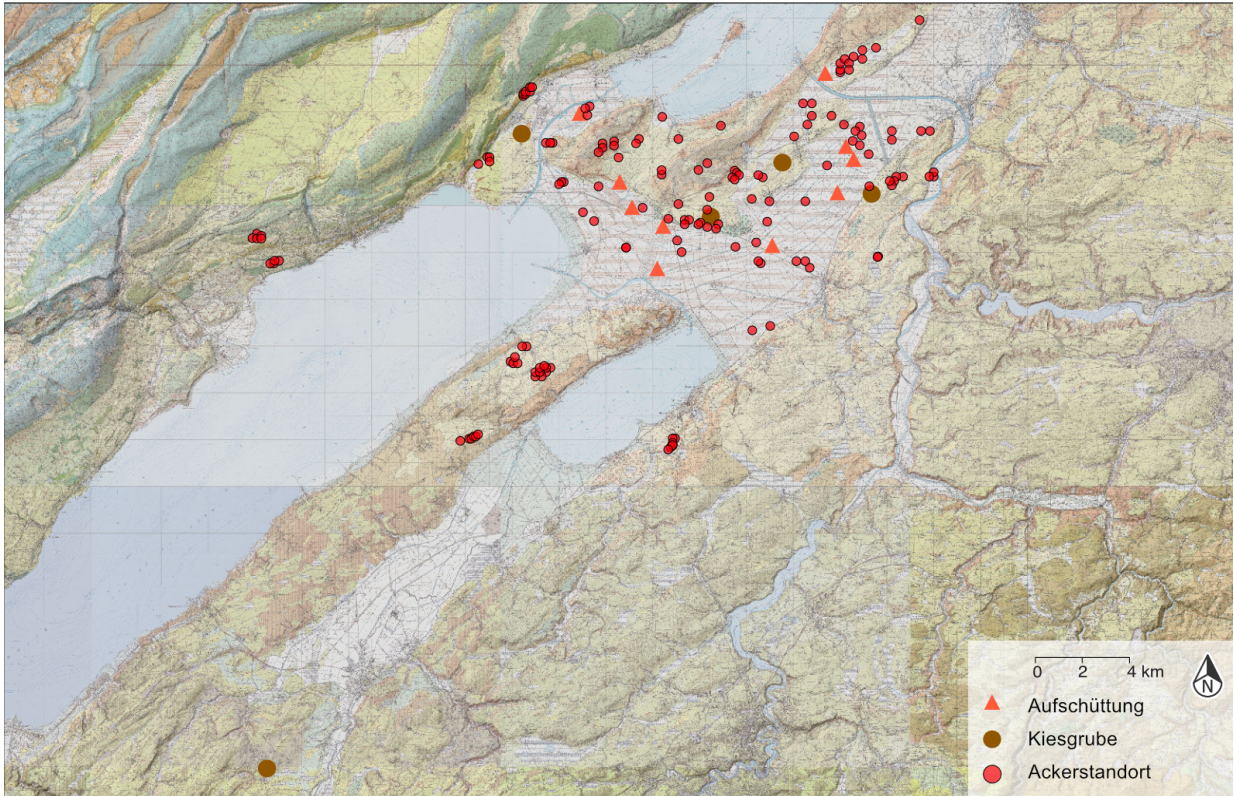


Abb. 1. Übersicht über alle Beprobungsstandorte (Ackerstandorte, Aufschüttungen und Kies- bzw. Abbaugruben). Im Hintergrund: geologische Karte Geologischer Atlas GA25 und swissALTI3D monodirektionales Relief (Swisstopo).

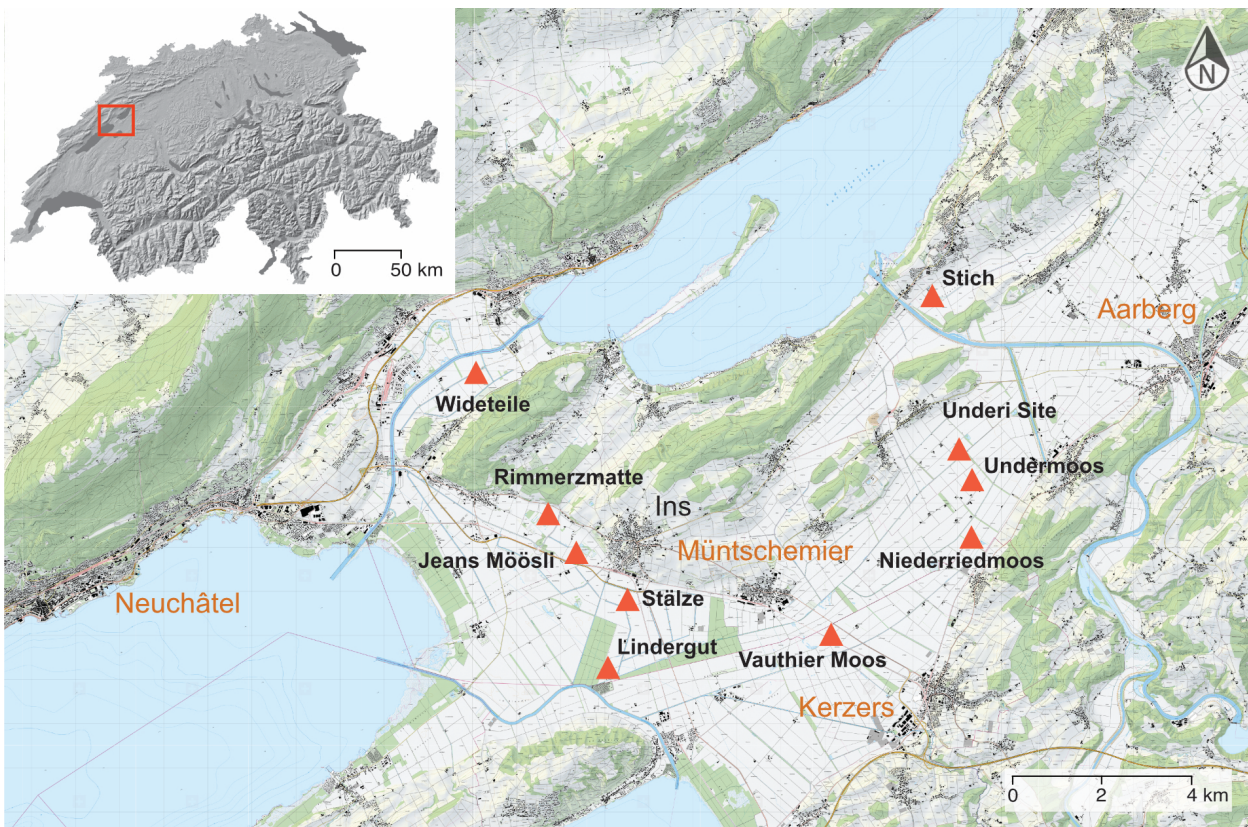


Abb. 2. Übersicht über die Standorte mit Aufschüttungen.

3. Methoden

a) Bodenprofile: 10 Bodenprofile der bereits erwähnten Kiesgruben wurden für chemisch-physikalische Analysen beprobt. Folgende Parameter wurden gemessen:

- Gesamtgehalte an Elementen (XRF), Karbonatgehalt
- pH, C, N, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$, LOI (loss on ignition)
- pedogene Fe-, Al- und Mn-Formen
- Bodenmineralogie an ausgewählten Proben
- Korngrößenverteilung
- Bodendichte, Skelettgehalt
- Makroporen, deren Konnektivität, Tortuosität etc. mittels Computertomographie (CT)
- Korngrößenformen und pedogene Prozesse mittels Mikromorphologie
- Pflanzennutzbare Gründigkeit

Die CT-Analysen wurden am Institute of Agrophysics PAS in Lublin (Polen) durchgeführt. Die Auswertung der Dünnschliffe wurde während eines wiss. Aufenthalts an der Università della Calabria (Italien) durchgeführt. Die Bodenmineralogie wird am Institute for Geotechnical Engineering (ETH Zürich) bestimmt. Die Bestimmung der pflanzennutzbaren Gründigkeit (PNG) erfolgte nach der Methodik des AfU Solothurn (2024).

b) Die Oberbodenproben von 166 Ackerstandorte wurden auf ihren Elementgehalt (XRF) und LOI geprüft.

c) Zehn Aufschüttungen wurden analysiert (Abb. 2 und 3): Korngrösse, Bodendichte, Skelettgehalt, CN Gehalte, pH, Elementgehalte, Fraktionierung des organischen Kohlenstoffs, Datierung dieser Fraktion (Radiokarbonmethode). An all diesen Standorten (Aufschüttungen und unbelassene Boden) erfolgten CO_2 -Messungen mit einem Schnelltest (Vernier Geräte).

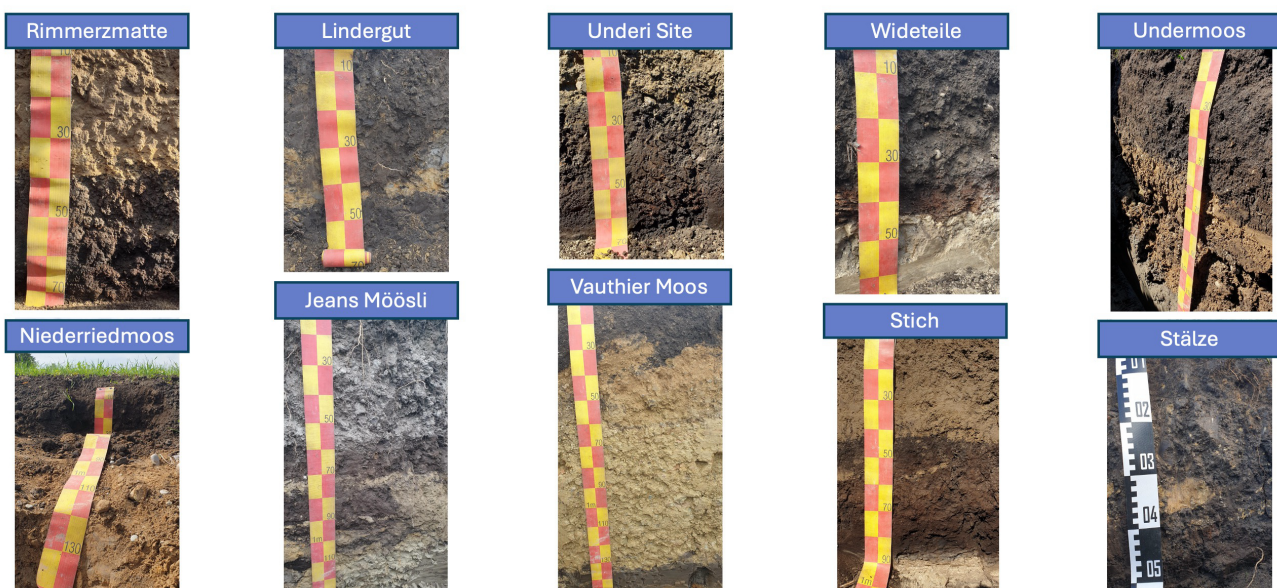


Abb. 3. Profilfotos der untersuchten Aufschüttungen.

d) Detaillierte Vergleichsmessungen zwischen aufgeschütteten und nicht aufgeschütteten ("Normalzustand") Böden an 3 ausgewählten Standorten (Isotopenanalysen: $\delta^{13}\text{C}$ und C-14):
 Nebst einer Charakterisierung der organischen Substanz (Ofiti et al., 2021; Schiedung et al., 2025) und deren Datierung, erfolgten direkt im Feld CO_2 -Gasflussmessungen (Minich et al., 2026). Diese Messungen wurden an 3 Standorten mit einem LICOR Gerät durchgeführt und zwar im Sommer und im Winter. Die 3 Standorte bestanden jeweils aus einem Kontrollstandort (ohne Aufschüttung und somit "natürlich"; d.h. landwirtschaftlich genutzt) und einem dazugehörigen Standort mit Aufschüttung. An jedem Standort wurden 3 Replikate gemessen. Pro Messkampagne wurden somit 18 Analysen durchgeführt.

Nebst dem respirierten CO_2 aus dem Boden musste auch der atmosphärische Hintergrund jedes Mal mitgemessen werden. Die gemessene CO_2 Konzentration und somit auch ^{14}C besteht aus:

$$\text{CO}_2(\text{m}) = \text{CO}_2(\text{at}) + \text{CO}_2(\text{r})$$

mit $\text{CO}_2(\text{m})$ = gemessenes CO_2 in situ, $\text{CO}_2(\text{at})$ = CO_2 der Atmosphäre und $\text{CO}_2(\text{r})$ = respiriertes CO_2 aus dem Boden. Die Isotopenwerte mussten entsprechend korrigiert werden, will man das respirierte CO_2 aus dem Boden erfassen und die gemessenen ^{14}C Gehalte (wie auch ^{12}C und ^{13}C ; mittels $\delta^{13}\text{C}$) korrekt bestimmen. Für die Gasprobenahme wurden an jedem Standort drei lichtgeschützte zylindrische PVC-Rahmen ($\varnothing = 30$ cm; Höhe = 15-25 cm; Volumen ~ 15 L) 3-5 cm tief in den Boden eingerammt, im Abstand von ein bis zwei Meter voneinander. Die CO_2 -Flüsse wurden über ein Durchflusssystem mit einem Licor-Gasanalysator (LI-8100A, LI-COR®) gemessen (Abb. 4). Für eine Allokation der C-Quellen, wurden ^{14}C Datierungen des CO_2 durchgeführt. Sehr alter Kohlenstoff kann der Veratmung von ehemaligem Torf zugewiesen werden, währenddem junger Kohlenstoff rezenten Input und Veratmung repräsentiert. Für die ^{14}C -Analyse wurden Gasproben mit einem speziell für Luftproben erstellten System graphitisiert (mit einer integrierten Zeolithfalle zur Adsorption von CO_2 aus dem Probenbeutel). Der $^{14}\text{CO}_2$ -Gehalt aller Gasproben wurde mit dem MICADAS-System der ETH Zürich oder einem Low Energy AMS (LEA, ETH Zürich & IonPlus AG, Schweiz) gemessen.



Abb. 4. Einsatz des LICOR Gerätes zur Gasbestimmung, sowie ein Beispiel einer Aufschüttung. Der darunter liegende Boden ist erkennbar an der dunklen Farbe.

Um die Bindungsstärke und Stabilität der organischen Fraktion in Böden besser beurteilen zu können wurde eine physikalische Fraktionierung durchgeführt. In Anlehnung an die Methodik von Christensen (1992) und von Lützwow et al. (2006) wurden a) eine Fraktion mit einer Dichte von $\leq 1 \text{ g/cm}^3$ (POM, particulate organic matter), b) $> 1 \text{ g/cm}^3$ und mit einer Korngröße von $\geq 63 \mu\text{m}$ und c) $> 1 \text{ g/cm}^3$ und mit einer Korngröße von $< 63 \mu\text{m}$ (MAOM, mineral associated organic matter) extrahiert. Zudem wurden die C,N Konzentrationen und die Kohlenstoff-Isotopenverhältnisse bestimmt (mittels EA-IRMS), sowie an ausgewählten Proben eine ^{14}C -Datierung an den physikalischen Fraktionen ($>$ und $< 63 \mu\text{m}$) durchgeführt. Die Fraktion $< 1 \text{ g cm}^{-3}$ war vernachlässigbar klein und wird folglich im Bericht nicht mehr weiter erwähnt. Die Charakterisierung der organischen funktionellen Gruppen erfolgte mittel Infrarot- Spektroskopie (DRIFT; Ellerbrock et al., 2009; Demyan et al., 2012).

4. Resultate

4.1. Materialeigenschaften (Bodenprofile und Ackerstandorte):

Das Bodenmaterial ist meist heterogen zusammengesetzt und besteht hauptsächlich aus Komponenten aus Granit, Sandstein, Kalk, Gabbro und Serpentin. Das geologische Ausgangssubstrat umfasst Moränenmaterial, Molassesedimente, alluvialem Material und westlichen Teil des Perimeters aus Kalk (Abb. 5). Die Kalk-Komponenten sind im Allgemeinen westlich des Zihlkanals/Gampelen höher als an anderen Standorten.

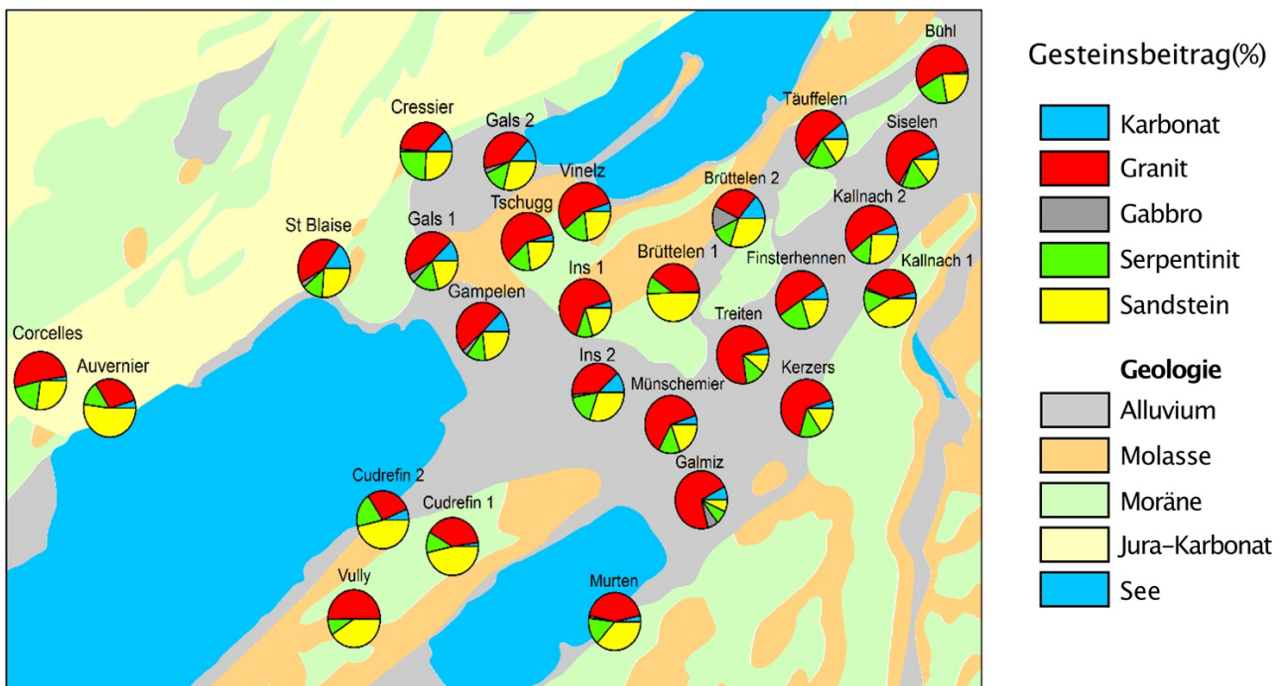


Abb. 5. Geologische Bestandteile des Bodenmaterials.

Silikatreiche Moränenablagerung haben eine komplexere Porosität und einen höheren Makroporenanteil (Abb. 6, 7 und 8) und somit bessere Eigenschaften für eine Hinterfüllung als karbonatreiches Material. Zusammen mit dem günstigen Tonanteil (vgl. Anhang 1 und 2) trägt solches Material besser zur Nährstoff- und Kohlenstoffspeicherung bei. Das karbonatreiche Material neigt zur Verdichtung und einer schlechten Belüftung und somit einem gestörten Wasserhaushalt. Als Beispiel seien hier die Gruben von Müntschemier und Cornaux erwähnt. Der Standort Müntschemier, wo silikatreiches Material vorherrscht, hat viel mehr Grobporen bereits im Ausgangsmaterial wie auch eine grössere Tortuosität und Konnektivität. Das Material in Cornaux ist viel kompakter, karbonatreich und weist im Ausgangsmaterial kaum Grobporen auf. Diese Eigenschaften sind für eine Aufschüttung Herstellung künstlicher Böden unvorteilhaft.

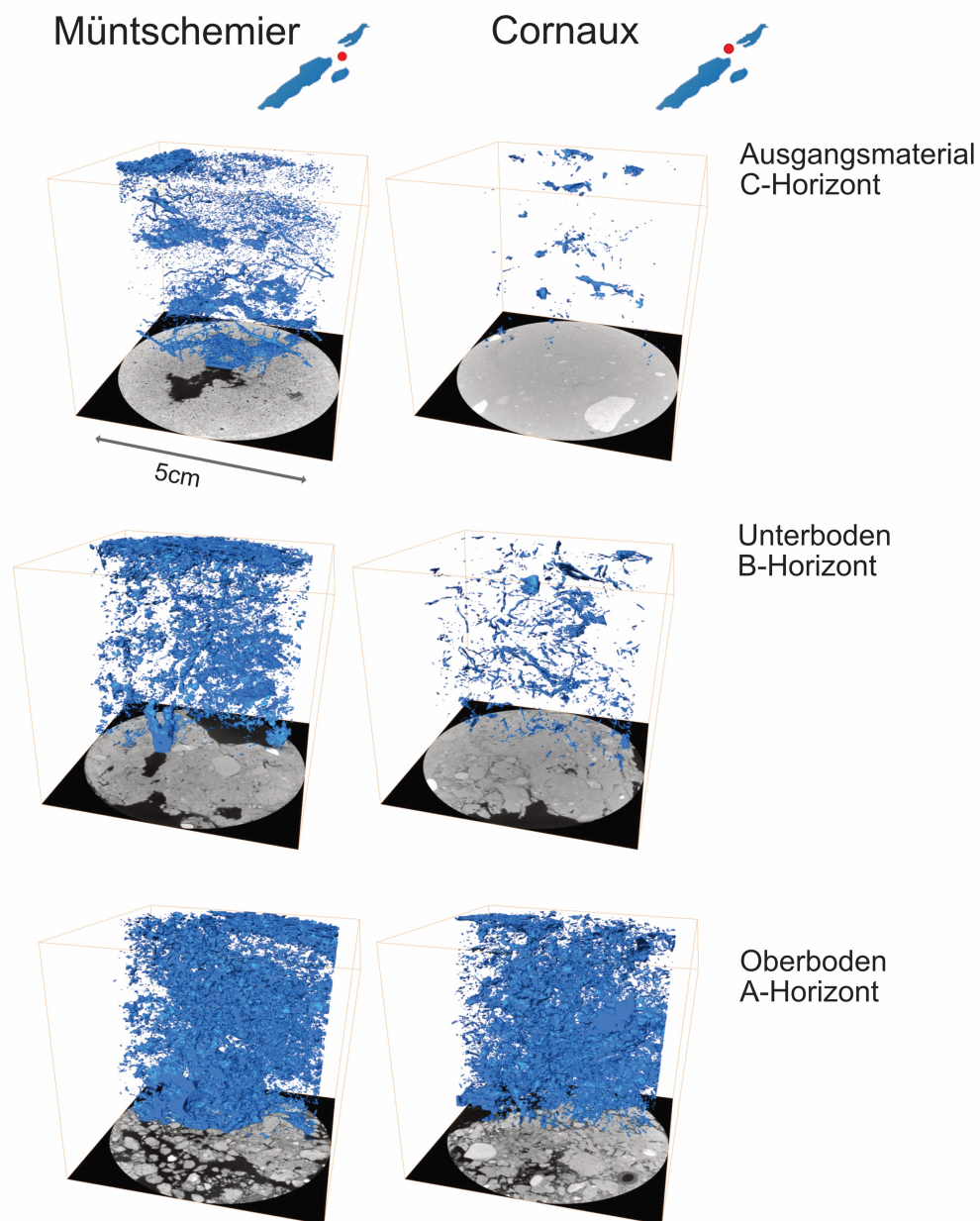
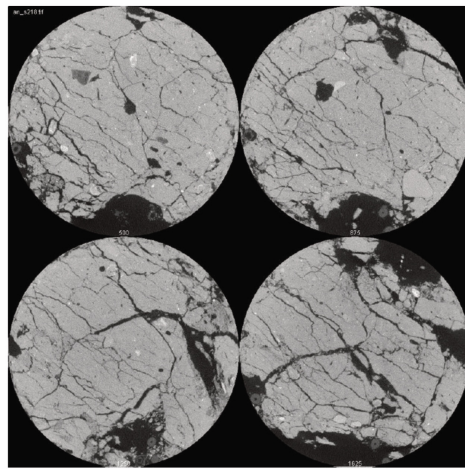


Abb. 6. Anteil an Makroporen in einem silikatreichen Standort (Müntschemier) und einem karbonatreichen Boden (Cornaux).

Cornaux



5cm



Müntschemier

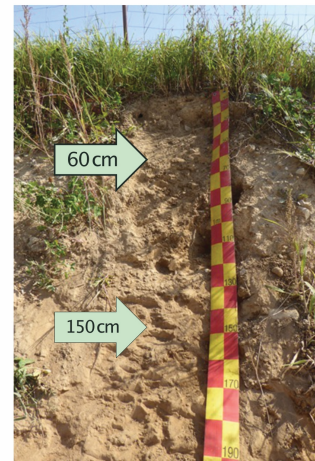
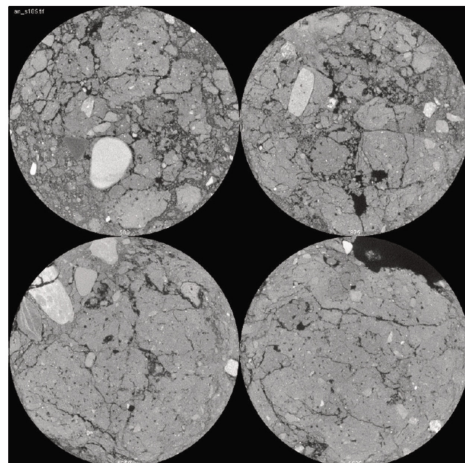
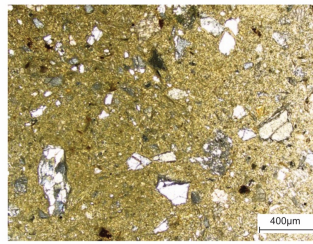
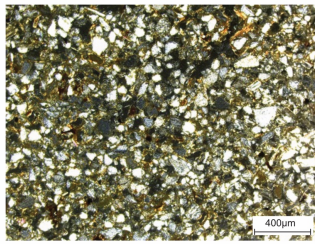


Abb. 7. CT-Aufnahmen von Querschnitten aus Beprobungszylindern von den Beispiel-Standorten Cornaux (karbonatreich) und Müntschemier (silikatreich). Man beachte die gerundeten Gesteinsformen und lockere Struktur am Standort Müntschemier, währenddem der Boden in Cornaux eine sehr kompakte Struktur aufweist.

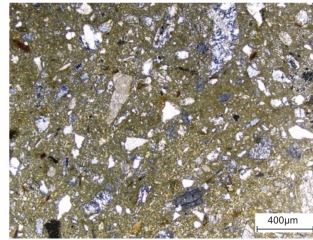
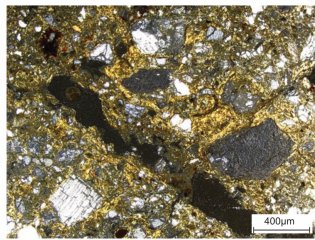
Müntschemier



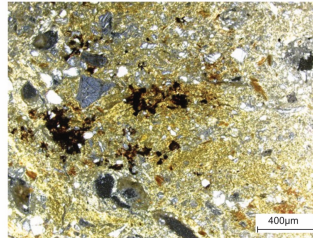
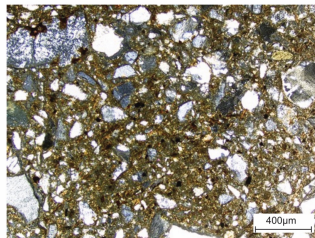
Cornaux



Ausgangs
C-Horizont



Unterboden
B-Horizont



Oberboden
A-Horizont

Abb. 8. Mikromorphologische Aufnahme der Böden der Standorte Müntschemier und Cornaux. Gut erkennbar ist die körnige Struktur im Ausgangsmaterial des Standortes Müntschemier im Gegensatz zur kompakten Masse am Standort Cornaux. Der Prozess der Tonverlagerung macht sich durch die orange-braune Farbe beim Standort Müntschemier im Unterboden erkennbar.

4.2. Aufschüttungen und Abbau organischer Böden: CO₂ Flüsse

Vergleichende CO₂ Messungen im Feld auf 10 aufgeschütteten Standorten und 10 Vergleichsstandorten ohne Aufschüttung wurden 2022 über ein Jahr durchgeführt. Nebst 360 CO₂ Messungen, wurden auch die Witterungs- (Temperatur, Taupunkt etc.) und Bodenbedingungen (org. C, Temperatur, Wassergehalt) wie auch die landwirtschaftliche Bearbeitung festgehalten. Die CO₂ Entgasung hängt primär von der Jahreszeit (im Sommer wesentlich mehr als im Winter), dem Taupunkt und dem org. C-Gehalt im Boden ab (Abb. 9).

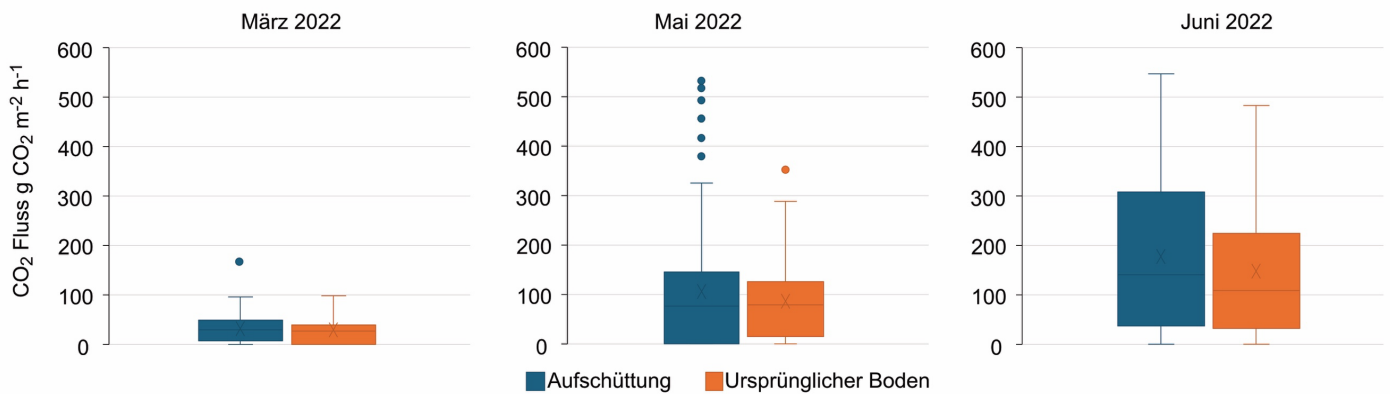


Abb. 9. Jahreszeitliche Schwankungen der CO₂ Flüsse aller 10 Vergleichsstandorte aus ursprünglichen Böden und Aufschüttungen (mit darunterliegenden organischen Böden).

Diese Schnellmessungen zeigen auf, dass die CO₂ Gesamt-Emissionen zwischen den unbelassenen und aufgeschütteten Böden in etwa gleich ist. Es muss betont werden, dass es sich hierbei um eine Art Schnelltest geht – zu Kosten auch etwas der Genauigkeit. Die Messungen zeigen aber auf, dass eine Aufschüttung die Emissionen sicher nicht erhöht. Die CO₂ Entgasung aus Aufschüttungen beinhaltet den Teil des neuen, künstlichen Bodens plus den Teil des darunter liegenden organischen Bodens.

Die CO₂-Emissionen und der Radiokohlenstoffgehalt (¹⁴CO₂) wurden an drei paarweisen verglichenen Standorten gemessen, wobei aufgefüllte und benachbarte unbelassene, organisch-reiche Böden verglichen wurden (Abb. 10).

Die Aufschüttungen zeigten durchweg etwas niedrigere CO₂-Emissionen, insbesondere in den Sommermonaten, in denen die Torfzersetzung am höchsten ist. Radiokohlenstoffmessungen weisen darauf hin, dass der Kohlenstoff aus den ursprünglichen, nicht aufgeschütteten organischen Böden wesentlich älter war (Abb. 10). Basieren auf den ¹⁴C-Messungen des CO₂ konnte eine Quantifizierung der CO₂-Flüsse und deren Quellen gemacht werden (Abb. 11; Minich et al., 2026). Auch in der Aufschüttung wird bodenorganisches Material abgebaut. Doch die Gesamtsumme aus beiden Böden – Aufschüttung und überschütteter Boden – ist insgesamt immer noch etwas niedriger als heutzutage weiterhin landwirtschaftlich genutzte, organische Böden.

Das Alter der bodenorganischen Substanz im unbelassenen wie im aufgeschütteten Boden ist im Pflughorizont ziemlich ähnlich. Sowohl in der Fraktion <63 als auch >63µm werden Alter deutlich über tausend Jahre gemessen (Anhang 3). Die CO₂ Emissionen aus der Überschüttung haben jedoch ein wesentlich jüngeres Alter als aus dem unbelassenen Boden. Dies verdeutlicht, dass die organische Materie in den unbelassenen Böden deutlich schwächer geschützt ist und sehr alter Kohlenstoff veratmet wird. Somit kann direkt nachgewiesen werden, dass die organischen Böden nach wie vor abgebaut werden. Bei einer Aufschüttung wird verstärkt rezente organische Substanz veratmet. Folglich ist die vorhandene, alte organische Substanz besser vor einem zusätzlichen Abbau geschützt.

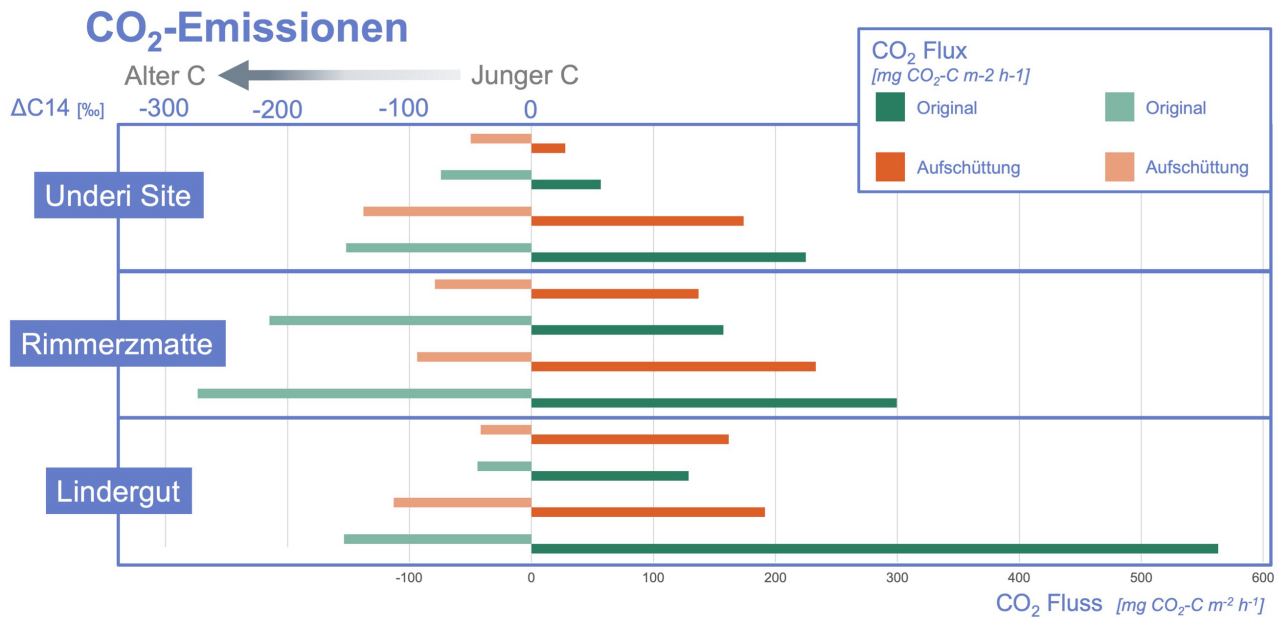


Abb. 10. CO₂ Flüsse aus dem Boden im Vergleich zwischen belassenen und aufgeschütteten Böden. Zusätzlich sind die ¹⁴C Konzentration im CO₂ angegeben (als Δ¹⁴C). Ein Δ¹⁴C-Wert von -200 entspricht in etwa einem ¹⁴C-Alter von 1800 Jahren.

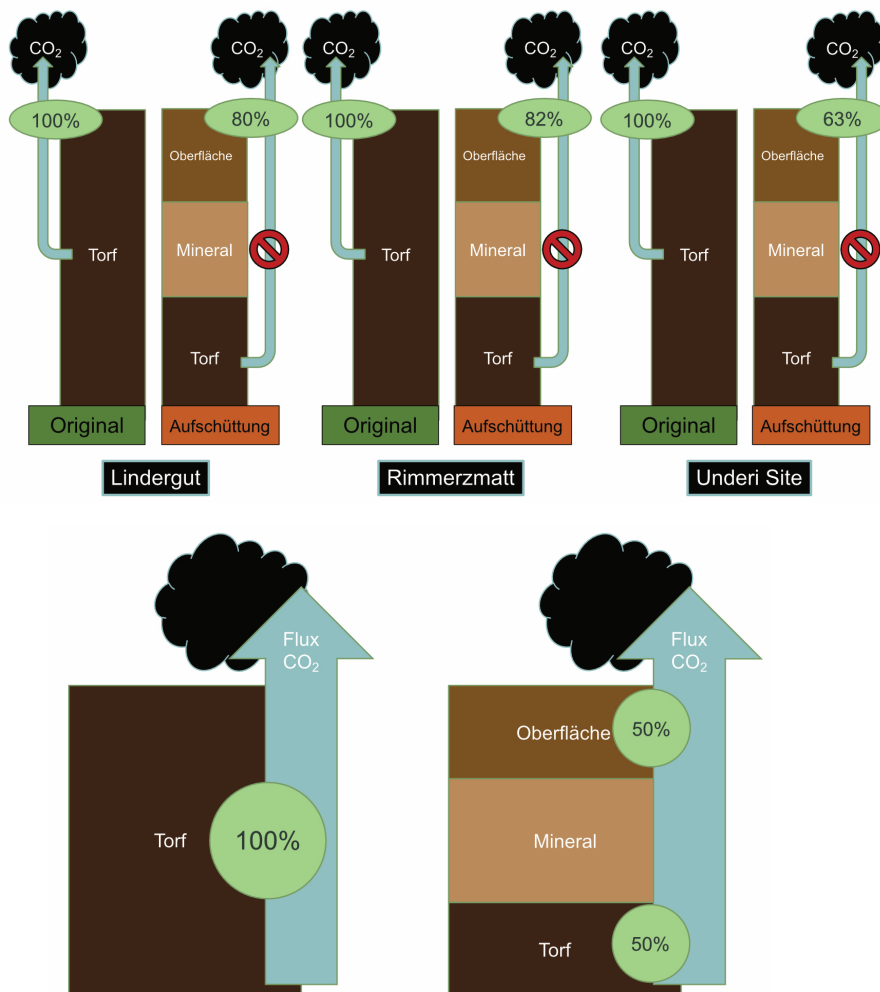


Abb. 11. Relativer Vergleich der CO₂-Flüsse zwischen Aufschüttung und unbelassenem Boden sowie deren Aufteilung in Bezug deren Herkunft.

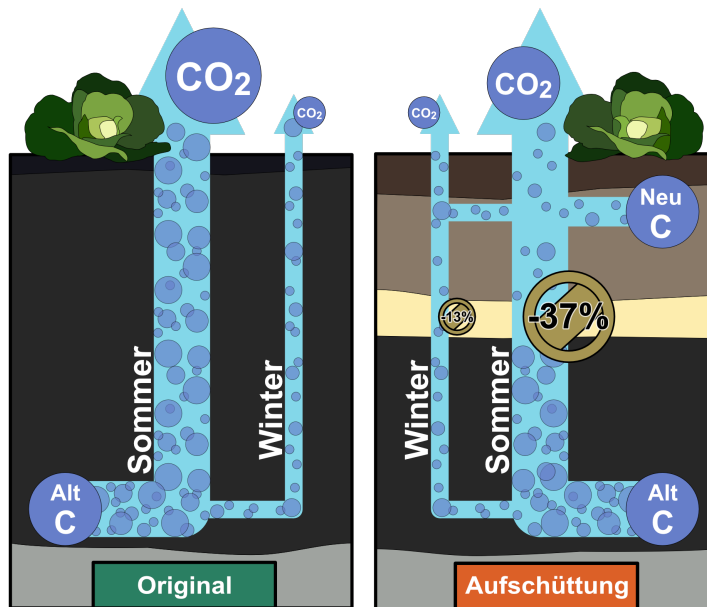


Abb. 12. Reduktion der CO₂-Stoffflüsse bei einer Aufschüttung, unterteilt in Sommer (höhere relative Reduktion; -37%) und Winter (geringere Reduktion; -13%). Mittlere Reduktion übers Jahr, -25%.

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass Aufschüttungen die Torferstörung oder den Abbau organischer Substanz effektiv verlangsamen. Bei Aufschüttungen sind die CO₂-Emissionen geringer (Abb. 11 und 12). Vor allem im Sommer sind die CO₂-Emissionen stark reduziert. Im Winter sind die Unterschiede wesentlich geringer. Der Effekt hängt jedoch stark vom ursprünglichen Zustand des Torfes vor der Aufschüttung ab. Standorte mit höheren verbleibenden Kohlenstoffbeständen tragen mehr zu den Emissionen bei, wenn sie ungeschützt bleiben, während eine Aufschüttung diese Bestände durch Begrenzung der Belüftung und des mikrobiellen Zugangs bewahren kann. Daher sind die Qualität und Quantität des verbleibenden Kohlenstoffbestands sowie die Eigenschaften des aufgefüllten Materials entscheidend, um die langfristige Effizienz von Renaturierungsmassnahmen aufrecht zu erhalten. Dies unterstreicht, dass erfolgreiche Auffüllstrategien sowohl die Auswahl des Standorts als auch die Torfzusammensetzung berücksichtigen müssen, um den Kohlenstoff zu maximieren und die Bodenfunktionen zu erhalten.

Unsere Erkenntnisse decken sich nur teilweise mit denjenigen von Wang et al. (2021). Untersuchungen im Rheintal zeigten, dass Aufschüttungen mit mineralischem Boden keinen signifikanten Einfluss auf die Menge der heterotrophen Respiration hatte und somit keine Reduktion der CO₂-Emissionen festgestellt werden konnte. Allerdings war bei der Aufschüttung die Radiokarbonsignatur des heterotrophen CO₂ signifikant ($p < 0.01$) jünger als am unbelassenen Standort. Dies deutet darauf hin, dass die Abdeckung mit mineralischem Boden die Quelle der Zersetzung von Bodenorganischem Kohlenstoff (SOC) von einem höheren Anteil alten Torfs hin zu einem höheren Anteil relativ jüngeren Materials verschoben hatte, was sich wiederum mit unseren Ergebnissen im Seeland deckt.

Es bleibt festzuhalten, dass – entgegen häufig geäußelter Meinung – landwirtschaftlich genutzte Böden im Seeland nach wie vor degradieren und Absenkungen und Oberflächenveränderung damit einhergehen. Mit Aufschüttungen wird dieser Abbauprozess reduziert, aber nicht vollständig gestoppt. Auch im aufgeschütteten Boden wird zusätzlich organische Materie mineralisiert. Die Summe beider Mineralisationsprozesse (Aufschüttung und darunter liegender organischer Boden) ist aber im Maximalfall gleich, sonst aber eher niedriger als bei bewirtschafteten organischen Böden ohne Aufschüttung.

Die CO₂ Flüsse waren über die beobachteten Zeitspannen um rund 25% geringer (bzw. die gesamten CO₂-Flüsse aus einer Überschüttung entsprechen 75% gegenüber dem unbelassenen Zustand). Bei Überschüttungen stammen rund etwa die Hälfte des CO₂ aus dem überschütteten Boden und rund etwa 50% aus der eigentlichen Überschüttung selbst.

In Bezug auf den ehemaligen organischen Boden oder Moor/Torf heisst das: der Abbau der organisch reichen Schichten verläuft etwa 3-mal langsamer als im unbelassenen Zustand (d.h. ohne Überschüttung).

4.3. Organischer Kohlenstoff im Boden: ein Vergleich zwischen unbelassenen Böden und Aufschüttungen

Der Gehalt an organischem Kohlenstoff ist in den aufgeschütteten Böden deutlich geringer. Die Tiefenverteilung zeigt praktisch kaum deutliche Trends, wie sie in natürlich gewachsenen Böden auftreten. Meist ist der Gehalt recht homogen und keine grösseren Änderungen mit der Tiefe (bis 50cm) sind beobachtbar. Im Gegensatz zu den unbelassenen Böden ist aber der Gehalt an anorganischem Kohlenstoff meist höher: trotzdem ist der Gesamtgehalt an Kohlenstoff tiefer als bei den unbelassenen Böden. Unterhalb von 50cm Tiefe trifft man zum Teil (aber nicht immer; je nach Situation) auf den ursprünglichen Boden. Als Folge der ursprünglichen landwirtschaftlichen Nutzung und später erfolgter Aufschüttung unterliegt der Gehalt an Kohlenstoff starken Schwankungen.

Insgesamt finden sich rund 22% des organischen Kohlenstoffs in der Fraktion < 63µm (Abb. 13 und 14). Es lassen sich teilweise sehr deutliche Unterschiede zwischen dem unbelassenen Boden und der Aufschüttung ausmachen. Meist ist eine wesentlich grössere Proportion an organischem Kohlenstoff in der Feinfraktion bei Aufschüttungen nachweisbar (Abb. 4). Genau gleiche Tendenzen lassen sich auch beim Stickstoff beobachten. Folglich ist die organische Substanz bei Aufschüttungen stärker an den mineralischen Teil gebunden und besser vor weiterem Abbau geschützt (Cotrufo et al., 2019; Lavalley et al., 2020; von Lützow et al., 2007; Yu et al., 2022).

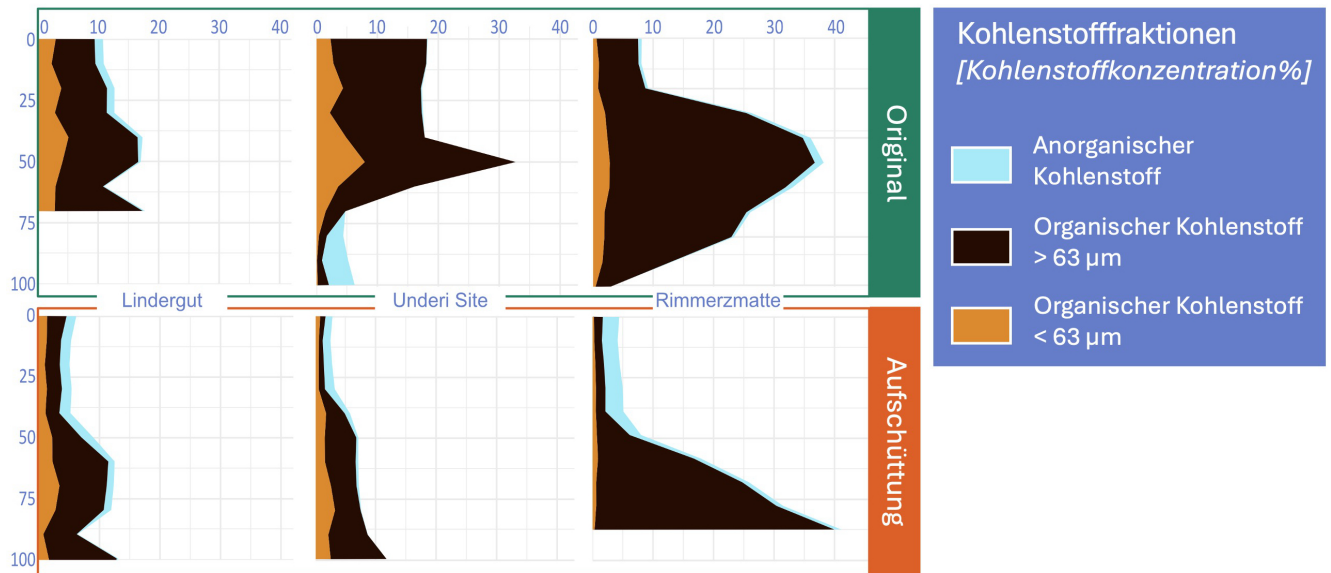


Abb. 13. Formen des Kohlenstoffs (anorganisch und organisch, und Verteilung des organischen Kohlenstoffs nach den Fraktionen < und > 63µm).

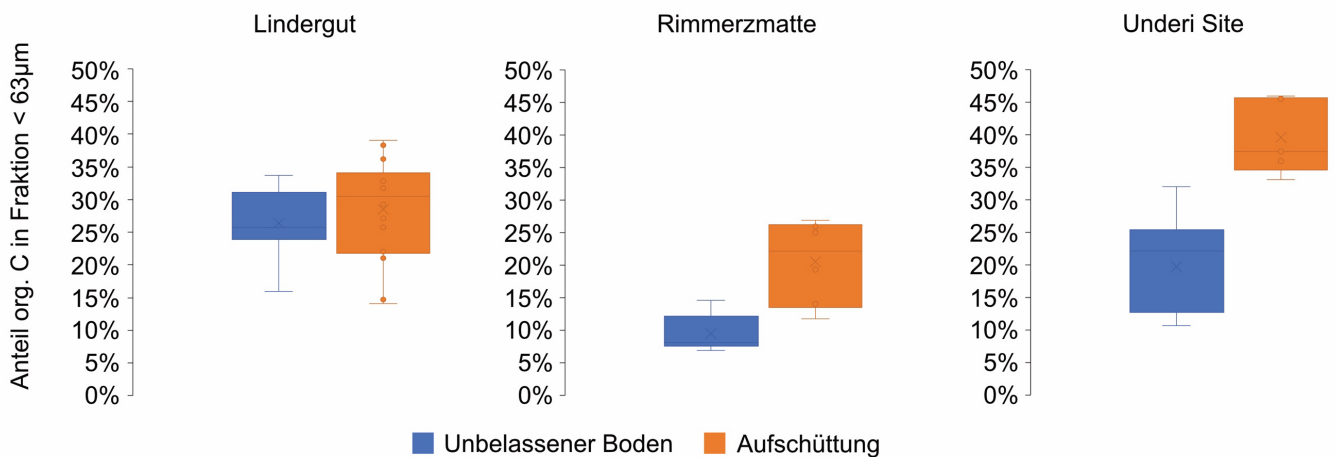


Abb. 14. Anteil des Boden-organischen Kohlenstoffs in der Feinfraktion (< 63µm; mineralisch gebundene Fraktion).

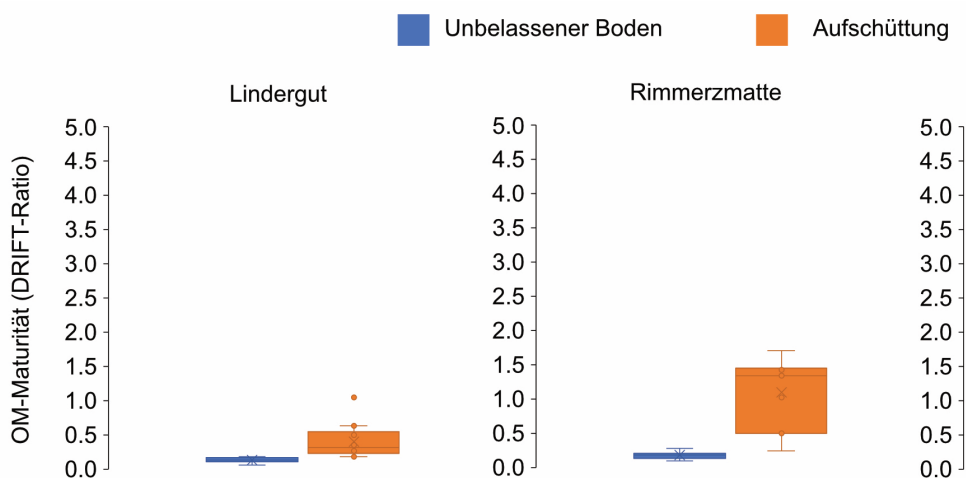


Abb. 15. Vergleich der Maturität der organischen Substanz zwischen den unbelassenen, originalen Böden und der Aufschüttung.

Die chemischen Eigenschaften der bodenorganischen Substanz sind bei der Aufschüttung für eine Bewirtschaftung vorteilhafter: die organische Materie weist eine geringere Hydrophobizität auf und ist stärker umgewandelt (bzw. lässt sich mittlerweile schlechter weiter abbauen; Abb. 15). Hinzu kommt, dass der bodenorganische Kohlenstoff physikalisch besser geschützt ist bzw. besser an die mineralische Matrix gebunden ist.

4.4. Pflanzennutzbare Gründigkeit

Die PNG wurde an den 10 Vergleichsstandorten (unbelassener Boden vs. Aufschüttung) erhoben. Die Methodik gemäss AfU Solothorn (2024) wird verbreitet angewendet. Gemäss Marti et al. (2025) ist diese Methodik für mineralische Böden geeignet, jedoch umstritten für die Beurteilung organischer Böden mit und ohne durchgeführte Aufwertungsmassnahmen. Folglich sind die Resultate mit der nötigen Vorsicht zu geniessen. Im allgemeinen scheint die PNG sich mit Aufschüttungen zu erhöhen (Abb. 16). Ein Fruchtfolgefläche benötigt eine PNG on mindestens 50cm. Die unbelassenen Böden erreichten in 70% der Fälle nicht diese Gründigkeit. Nach einer Aufschüttung war der Wert erhöht. In 40% der Fälle wurde die eine PNG von 50cm aber immer noch nicht erreicht. Limitierende Faktoren waren Verdichtungserscheinungen, ungünstiges Gefüge (wie bspw. Klumpengefüge) udgl.

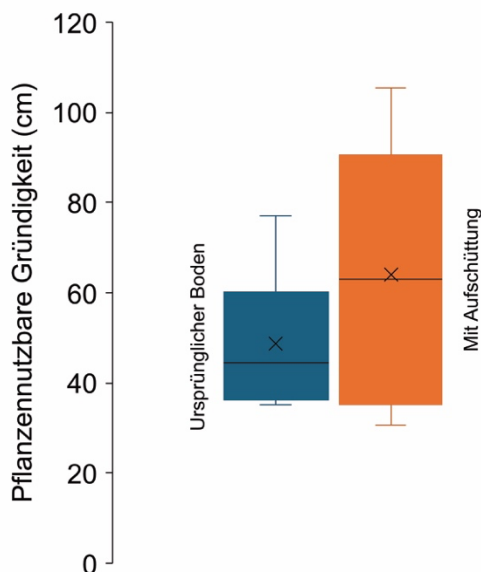


Abb. 16. Pflanzennutzbare Gründigkeit unbelassener Böden und mit einer Aufschüttung.

5) Schlussfolgerungen

Durch eine vollständige Analyse von 10 Profilen, die in den 5 Steinbruchstandorten (Kallnach, Finsterhennen, Müntschemier, Cornaux, Ménières) durchgeführt wurden, sowie von 166 Ackerstandorten konnten wir die natürliche Bodenentwicklung und Herkunft des geologischen Ausgangssubstrats nachvollziehen. Wir konnten zwei Haupttypen an Materialien unterscheiden:

Materialien, die reich an Karbonat sind, und solche, die mehr Ton enthalten bzw. von Tonverlagerung betroffen sind und einen hohen Silikatanteil aufwiesen. Karbonatreiche Böden enthalten entschieden weniger Grobporen als silikatreiches Material (vgl. Abb. 5) und sind allfälliger auf Verdichtung. Die silikatreichen Böden haben einen zum Teil einen recht hohen Sand-Anteil (Tabelle 1) und abgerundete Gesteinsformen (Abb. 6). Folglich ist der Einsatz von karbonatreichem Material (speziell aus der Region westlich des Zihlkanals) mit potentiellen Nachfolgeproblemen verbunden.

Generell sind die Emissionen aus aufgeschütteten Böden geringer (ca. -25 %) als aus nicht verfüllten Böden. Mittels ^{14}C Messungen im CO_2 konnte aufgezeigt werden, dass in Moorböden zum Teil sehr alter Kohlenstoff veratmet wird (Abb. 10). Die ^{14}C Messungen wiesen des weiteren darauf hin, dass eine Aufschüttung den Torfabbau bzw. den Abbau organischer Materie von ehemaligen Moorböden mindestens halbiert. Eine Aufschüttung stoppt den Abbau der organischen Materie des darunterliegenden Bodens nicht vollständig, verlangsamt aber dessen Abbau deutlich.

Aufgeschüttete Böden haben im Normalfall eine grössere pflanzennutzbare Gründigkeit. Trotzdem weisen aber immer noch 40% eine Gründigkeit von < 50cm auf und können folglich nicht als Fruchtfolgeflechte klassiert werden.

Die Qualität einer Aufschüttung und des neuen Bodens hängt schlussendlich stark davon ab, welches Material und wie es eingebracht wurde. Ein guter Bodenaufbau bei Aufschüttungen ist zwingend, das Material muss genügend Grobporen aufweisen und muss bei günstigen Witterungs- und Bodenbedingungen eingebracht werden.

Regenwürmer fördern die Aggregatbildung und den Einbau organischer Substanz in den Boden. Eine Gefügebildung im Boden lässt sich nach 50 Jahren einer Aufschüttung praktisch kaum nachweisen – höchstens ansatzweise. Das Material bleibt schlecht durchmischte. Die Population der Regenwürmer hat sich möglicherweise nach dem Eingriff noch nicht vollständig etabliert.

Literatur

- AfU (Amt für Umwelt) Solothurn, 2024. Bodenkartierung Kanton Solothurn. Projekthandbuch. Kartiermethodik. Kartiermethode FAL 24+. Solothurn.
- BLW (Bundesamt für Landwirtschaft), BLV (Bundesamt für Lebensmittelsicherheit und Veterinärwesen), BAFU (Bundesamt für Umwelt), 2025. Klimastrategie Landwirtschaft und Ernährung 2050. Bern.
- Christensen, B.T., 1992. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. *Advances in Soil Science*, vol. 20. CRC Lewis Publishers, Boca Raton, pp. 1–90.
- Cotrufo, M.F., Ranalli, M.G., Haddix, M.L., Six, J., Lugato, E., 2019. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter. *Nature Geoscience* 12, 989–994. doi: 10.1038/s41561-019-0484-6.
- Demyan, M.S., Rasche, F., Schulz, E., Breulmann, M., Müller, T., Cadisch, G., 2012. Use of specific peaks obtained by diffuse reflectance Fourier transform mid-infrared spectroscopy to study the composition of organic matter in a Haplic Chernozem. *European Journal of Soil Science* 63, 189–199. doi:10.1111/j.1365-2389.2011.01420.x
- Egli, M., Gärnter, H., Rösli, C., Seibert, J., Wiesenberg, G., Wingate, V. (eds.), 2020. *Landschaftsdynamik im Gebiet des Grossen Mooses: Moorböden, Wassermanagement und landwirtschaftliche Nutzung im Spannungsfeld zwischen Produktivität und Nachhaltigkeit*. Schriftenreihe Physische Geographie, Zürich.
- Egli, M., Wiesenberg, G., Leifeld, J., Gärtner, H., Seibert, J., Rösli, C., Wingate, V., Dollenmeier, W., Griffel, P., Suremann, J., Weber, J., Zyberaj, M., Musso, A., 2021. Formation and decay of peat bogs in the vegetable belt of Switzerland. *Swiss Journal of Geosciences* 114, 2. <https://doi.org/10.1186/s00015-020-00376-0>
- Ellerbrock, R.H., Gerke, H.H., Böhm, C., 2009. In situ DRIFT characterization of organic matter composition on soil structural surfaces. *Soil Science of America Journal* 73, 531-540.
- Lavallee, J. M., Soong, J. L., Cotrufo, M. F., 2020. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Global Change Biology* 26(1), 261–273. doi: 10.1111/gcb.14859.
- Marti, A., Kormann, I., Junker, L., Hunkeler, D., Burgos, S., Vogel, S., 2025. Ressourcenprojekt Bodenverbesserung Seeland. Schlussbericht 2019–2025. Berner Fachhochschule, Zollikofen.
- Minich, L.I., Beem-Miller, J., Mittelbach, B., Geissbühler, D., Udke, A., Wasner, D., Duborgel, M.M., McMackin, C., Brunmayr, A.S., Wacker, L., Gautschi, P., Haghypour, N., Egli, M., Leifeld, J., Eglinton, T.I., Hagedorn, F., 2026. A radiocarbon-based framework to assess soil organic carbon persistence and vulnerability across land-use types. *Global Change Biology*, in press.
- Ofiti, N.O.E., Zosso, C.U., Soong, J.L., Solly, E.F., Torn, M.S., Wiesenberg, G.L.B., Schmidt, M.W.I., 2021. Warming promotes loss of subsoil carbon through accelerated degradation of plant-derived organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 156, 108185, 1-10.
- Rösli, C., Egli, M., 2024. Using historical data to access the surface subsidence in the vegetable belt of the Three Lakes Region, Switzerland. *Swiss Journal of Geosciences* 117, 9. <https://doi.org/10.1186/s00015-024-00452-9>.
- Schiedung, M., Barré, P., Peoplau, C., 2025. Separating fast from slow cycling soil organic carbon – A multi-method comparison on land use change sites. *Geoderma* 453, 117154. doi:10.1016/j.geoderma.2024.117154
- Schweizerischer Bundesrat, 2020. Bodenstrategie Schweiz für einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden. Umwelt-Info, UI-2018-D, Bern, 64 S.
- Schweizerische Eidgenossenschaft, 2020. Botschaft zur Weiterentwicklung der Agrarpolitik ab 2022 (AP22+). 20.022. 3955- 4212
- Von Lützwow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B., Flessa, H., 2006. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions – a review. *European Journal of Soil Science* 57, 426–445.
- Wang, Y., Paul, S.M., Jocher, M., Espic, C., Alewell, C., Szidat, S., Leifeld, J., 2021. Soil carbon loss from drained agricultural peatland after coverage with mineral soil. *Science of the Total Environment* 800, 149498. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149498>

- Wüst-Galley, C., Grünig, A., Leifeld, J., 2020. Land use-driven historical soil carbon losses in Swiss peatlands. *Landscape Ecology* 35, 173–187.
- Yu, W., Huang, W., Weintraub-Leff, S.R., Hall, S.J., 2022. Where and why do particulate organic matter (POM) and mineral-associated organic matter (MAOM) differ among diverse soils? *Soil Biology and Biochemistry*. Elsevier Ltd, 172(June), p. 108756. doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108756.

Anhang 1. Physikalisch-chemische Analysen zu den Bodenprofilen (Kies- und Abbaugruben). Dargestellt sind die Boden-Farbe, der pH-Wert, Skelettgehalt (>2000 µm), Bodendichte, Gehalt an organischem Kohlenstoff (Org C), Karbonatgehalt (CaCO₃), Anteil des Karbonats aus pedogenen Prozessen (Pedogen.), die stabile Kohlenstoffisotope (δ¹³C) sowie die Textur mit S = Sand / L = Lehm / C = Ton, Korngrößen mit Anteil von Sand (2000–63 µm), Schluff (63–2 µm) und Ton (<2 µm), sowie die Grenzübergänge zwischen den Bodenhorizonten, Struktur und Konsistenz. Die gestrichelte Linie kennzeichnet die lithologische Diskontinuität.

	Tiefe cm	Horizont	Munsell -Farbe	pH CaCl ₂	Org C %	CaCO ₃ %	Pedogen. % CaCO ₃	δ ¹³ C ‰	Skelett %	Boden- dichte g cm ⁻³	Sand %	Silt %	Ton %	Textur	Grenzen	Struktur	Konsistenz.
<i>Müntschemier 1</i>	0-30	Ah	10YR 6/3	6.8	1.18	0.36	84.9	-25.6	9.6	1.3	56.1	18.6	25.3	SCL	Smooth clear	Granular	Very friable
	30-60	AE	10YR 6/2	6.8	1.14	0.08	83.0	-25.2	12.6	1.4	60.7	20.4	18.9	SL	Smooth clear	Subangul ar blocky	Friable
	60-90	AE/Bt	10YR 6/4	6.8	0.71	0.08	88.4	-26.8	7.7	1.7	55.6	19.7	24.7	SCL	Smooth gradual	Subangul ar blocky	Firm
	90-130	Bt	10YR 6/4	6.8	0.26	0.06	83.5	-25.4	6.9	1.5	55.9	18.3	25.8	SCL	Smooth gradual	Angular blocky	Firm
	130-150	Bt2	10YR 5/6	6.9	0.29	0.07	93.9	-28.5	1.3	1.6	64.8	7.9	27.3	SCL	Smooth diffuse	Angular blocky	Firm
	150-200	C	10YR 5/6	6.5	0.18	0.07	87.6	-26.6	4.7	1.4	80.8	2.2	17.0	SL		Massive	Firm
<i>Müntschemier 2</i>	0-30	Ah/E	10YR 6/2	5.4	1.02	0.13	89.3	-27.1	9.4	1.6					Smooth clear	Subangul ar blocky	Very friable
	30-50	Bt	10YR 6/4	5.5	0.54	0.08	85.3	-25.9	16.8	1.2					Smooth gradual	Subangul ar blocky	Firm
	50-100	C	10YR 6/4	6.7	0.44	0.08	89.0	-27.0	9.8	1.6					Smooth abrupt	Angular blocky	Firm
	100-140	2Ca	5Y 7/4	7.4	0.33	20.31	11.0	-4.0	18.4	1.7					Smooth clear	Massive	Firm
	140-200	2Ca2	5Y 7/3	7.6	0.29	22.47	5.9	-2.5	8.0	1.7						Massive	Firm
<i>Ménières 1</i>	0-10	Ah/E	10YR 6/2	5.9	2.44	0.10	93.7	-28.4	3.9	1.3	67.3	22.5	10.2	SL	Smooth clear	Granular	Friable
	10-40	Bt	10YR 6/4	4.4	0.17	0.14	85.4	-25.9	6.3	1.4	51.8	25.9	22.4	SCL	Wavy gradual	Angular blocky	Firm
	40-90	Bt/C	10YR 5/6	5.9	0.12	0.08	94.6	-28.7	0.3	1.7	86.2	3.6	10.2	LS	Smooth gradual	Subangul ar blocky	Firm
	90-130	C	10YR 5/6	6.3	0.12	0.09	94.8	-28.7	5.1	1.6	87.7	3.6	8.7	LS	Smooth abrupt	Subangul ar blocky	Firm
	130-150	2Ca	5Y 7/2	7.7	0.09	15.32	7.3	-2.9		1.9	94.2	4.2	1.6	S	Smooth clear	Single grained	Loose
	150-200	2Ca2	5Y 7/2	7.9	0.00	19.90	2.6	-1.5	46.9	1.9	94.3	3.9	1.7	S		Single grained	Loose
<i>Ménières 2</i>	0-10	Ah	10YR 4/2	6	4.46	0.30	88.6	-26.9	24.6	0.8					Smooth clear	Subangul ar blocky	Very friable

<i>Finsterhennen 1</i>	10-40	E	10YR 7/4	6.3	0.52	0.08	97.5	-29.5	6.7	1.7					Wavy gradual	Subangular blocky	Friable
	40-70	Bt	10YR 5/4	6.6	0.26	0.12	82.9	-25.2	39.7	1.4					Smooth gradual	Subangular blocky	Firm
	70-120	C	10YR 5/6	5	0.27	0.14	89.1	-27.0	44.3	1.5					Smooth abrupt	Subangular blocky	Firm
	120-200	2C α	5Y 7/2	7.6	0.15	13.72	5.2	-2.3	56.1	1.9						Single grained	Loose
	0-10	Ah	10YR 7/3	4.6	3.06	0.16	92.8	-28.1	16.8	1.2	55.6	26.0	18.4	SL	Smooth clear	Granular	Very friable
<i>Finsterhennen 2</i>	10-40	E	10YR 7/4	4.1	0.82	0.12	92.6	-28.1	10.1	1.7	56.7	25.1	18.2	SL	Wavy gradual	Subangular blocky	Friable
	40-90	Bt	10YR 6/6	3.8	0.24	0.17	88.7	-26.9	16.9	1.6	47.2	30.3	22.5	L	Smooth gradual	Angular blocky	Firm
	90-130	Bt2	10YR 5/6	4	0.15	0.14	88.1	-26.7	24.9	1.4	63.4	17.6	19.0	SL	Smooth clear	Angular blocky	Firm
	130-190	2C α	2.5Y 6/4	7.4	0.25	12.77	6.7	-2.7	45.3	1.8	71.4	20.2	8.4	SL	Smooth clear	Massive	Firm
	190-200	2C α 2	5Y 7/3	7.7	0.06	22.72	4.5	-2.1	34.1	1.8	68.5	23.3	8.2	SL		Massive	Firm
	0-20	Ah	10YR 7/1	5.7	2.03	0.15	91.4	-27.7	9.7	1.4					Smooth clear	Granular	Very friable
	20-60	E	10YR 7/4	4.1	0.42	0.12	86.3	-26.2	4.8	1.5					Smooth gradual	Subangular blocky	Friable
<i>Kallnach 1</i>	60-90	Bt	10YR 6/3	4	0.14	0.13	87.8	-26.7	19.4	1.6					Smooth gradual	Angular blocky	Firm
	90-175	Bt2	10YR 6/3	3.9	0.20	0.22	87.3	-26.5	6.1	1.6					Smooth gradual	Angular blocky	Firm
	175-300	C	10YR 6/4	4.6	0.14	0.19	90.3	-27.4	21.3	1.4					Smooth clear	Angular blocky	Firm
	300+	2C α	5Y 7/3	6.9	0.12	23.73	4.9	-2.2	53.6	1.7						Massive	Firm
	0-10	A τ	2.5 6/4	7.3	0.72	8.53	29.5	-9.5	13.5	1.2	38.2	38.4	23.4	L	Smooth clear	Granular	Very friable
	10-25	E	10YR 6/3	4.5	0.61	0.07	88.6	-26.9	22.1	1.3	59.7	21.6	18.7	SL	Wavy gradual	Subangular blocky	Friable
	25-40	Bt	10YR 5/6	3.9	0.36	0.11	85.8	-26.1	22.6	1.3	60.6	17.7	21.7	SCL	Smooth gradual	Subangular blocky	Firm
<i>Kallnach 2</i>	40-65	Bt2	10YR 6/6	4.1	0.21	0.11	83.2	-25.3	25.7	1.3	56.0	20.3	23.7	SCL	Smooth gradual	Angular blocky	Firm
	65-110	C	10YR 5/4	7.2	0.40	1.04	47.8	-14.9	23.1	1.4	61.8	17.9	20.3	SCL	Smooth clear	Massive	Firm
	110-150	2C α	5Y 7/3	7.6	0.47	28.72	2.0	-1.4	42.7	1.5	54.7	31.5	13.8	SL	Smooth clear	Massive	Firm
	150-200	2C α 2	2.5Y 6/4	7.7	0.40	27.10	0.7	-1.0	50.5	1.6	61.1	29.0	9.9	SL		Massive	Firm
	0-10	A τ	10 YR 6/3	7.3	1.10	18.81	26.2	-8.5	1.3	1.3					Smooth clear	Granular	Very friable
10-25	E	10YR 5/6	4.1	0.59	0.10	90.8	-27.6	7.0	1.6					Wavy gradual	Subangular blocky	Friable	
25-50	Bt	10YR 6/6	3.9	0.32	0.16	92.9	-28.2	14.1	1.5					Smooth gradual	Angular blocky	Firm	

	50-90	C	10YR 5/4	4.1	0.21	0.11	94.2	-28.6	6.2	1.5						Smooth clear	Massive	Firm
	90-120	2Ca	2.5Y 5/4	7.5	0.29	5.46	24.1	-7.9	19.1	1.5						Smooth clear	Massive	Firm
	120-150	2Ca2	5Y 7/4	7.6	0.27	18.21	6.8	-2.8	21.1	1.5						Smooth clear	Massive	Firm
	150-200	2Ca3	5Y 7/3	7.7	0.35	22.40	3.4	-1.8	38.5	1.5							Massive	Firm
<i>Cornaux 1</i>	0-10	A	2.5 6/4	7.5	0.80	4.84	65.0	-19.9	2.1	1.5	53.2	28.5	18.3	SL	Smooth clear	Granular	Friable	
	10-45	Bk	5Y 7/3	7.7	0.12	25.80	16.1	-5.5	19.8	1.6	47.1	39.3	13.6	L	Smooth diffuse	Subangular blocky	Firm	
	45-100	Ca	5Y 7/4	7.5	0.20	23.62	7.9	-3.1	14.1	1.6	61.2	28.6	10.2	SL	Smooth diffuse	Massive	Firm	
	100-140	Ca2	5Y 7/4	7.6	0.29	25.39	8.7	-3.3	28.2	1.7	55.9	32.2	11.9	SL	Smooth diffuse	Massive	Firm	
<i>Cornaux 2</i>	140-200	Ca3	5Y 7/3	7.4	0.26	24.95	7.4	-2.9	13.6	1.8	51.0	35.3	13.7	L			Massive	Firm
	0-15	A	2.5Y 6/5	7.6	0.70	2.19	72.3	-22.1	7.3	1.3						Smooth clear	Granular	Friable
	15-40	Bk	5Y 7/3	7.7	0.36	27.15	16.2	-5.5	5.5	1.7						Smooth diffuse	Subangular blocky	Firm
	40-80	Bk2	5Y 7/4	7.5	0.27	24.28	10.3	-3.8	7.4	1.9						Smooth diffuse	Subangular blocky	Firm
	80-110	Ca	5Y 7/4	7.8	0.29	25.87	11.5	-4.2	7.3	1.6						Smooth diffuse	Massive	Firm
	110-200	Ca2	5Y 7/5	7.7	0.17	26.90	8.20	-3.2	3.7	1.7							Massive	Firm

Anhang 2. Einige generelle chemisch-physikalische Eigenschaften der Böden (Mittelwerte von Originalzustand, Aufschüttung).

Standort	Behandlung	pH (CaCl ₂)	Bodendichte (g cm ⁻³)	Körnung %			Oxalat [g kg ⁻¹]		
				Sand	Silt	Ton	Al	Fe	Mn
Lindergut	Original	6.96	0.88	30.7	28.6	40.7	1.02	3.90	0.13
Lindergut	Aufschüttung	7.11	1.12	37.8	31.5	30.8	0.69	3.13	0.10
Rimmerzmatte	Original	6.60	0.71	34.5	19.0	46.5	1.32	4.98	0.15
Rimmerzmatte	Aufschüttung	7.22	1.18	77.4	9.7	12.8	0.43	2.36	0.14
Underi Site	Original	5.64	0.72	37.7	26.5	35.7	1.14	9.58	0.17
Underi Site	Aufschüttung	6.94	1.04	35.4	36.5	28.1	0.52	5.75	0.16

Anhang 3. Radiokarbonalter der organischen Fraktionen sowie Angaben zu den stabilen Isotopen-Verhältnissen ($\delta^{13}\text{C}$). Die ^{14}C Daten wurde mit OxCal dendro-kalibriert (2- σ Bereich). SD = Standardabweichung.

Site	Behandlung	Tiefe [cm]	Fraktion	Org. C (%)	^{14}C age		F^{14}C		$\delta^{13}\text{C}$ ‰	cal. age	
					BP	$\pm\text{SD}$	BP	$\pm\text{SD}$		yr BP (2- σ)	Median, yr BP
Rimmerzmatte	Original	0-10	<63 μm	6.36	2626	24	0.72	0.002	-29.9	2769 – 2727	2750
Rimmerzmatte	Original	0-10	$\geq 63\mu\text{m}$	7.60	2415	24	0.74	0.002	-26.4	2681 – 2352	2430
Rimmerzmatte	Original	50-60	<63 μm	35.65	6909	32	0.42	0.002	-29.4	7831 – 7672	7733
Rimmerzmatte	Original	50-60	$\geq 63\mu\text{m}$	36.96	6923	32	0.42	0.002	-33.1	7836 – 7676	7745
Rimmerzmatte	Aufschüttung	0-10	<63 μm	1.95	2035	24	0.78	0.002	-29.9	2052 – 1890	1970
Rimmerzmatte	Aufschüttung	0-10	$\geq 63\mu\text{m}$	1.68	2001	24	0.78	0.002	-27.1	1996 – 1873	1939
Rimmerzmatte	Aufschüttung	50-60	<63 μm	7.77	3341	26	0.66	0.002	-28.8	3680 – 3483	3556
Rimmerzmatte	Aufschüttung	50-60	$\geq 63\mu\text{m}$	5.97	-	-	-	-	-	-	-
Rimmerzmatte	Aufschüttung	>100	<63 μm	19.59	6963	31	0.42	0.002	-28.0	7920 – 7694	7789
Rimmerzmatte	Aufschüttung	>100	$\geq 63\mu\text{m}$	40.31	7122	32	0.41	0.002	-31.5	8014 – 7867	7950