

# AUS FLACHMOOREN ENTSTANDENE ENTWÄSSERTE TORFBÖDEN

LANDWIRTSCHAFTLICHE NUTZUNG UND TORFERHALT  
ERFAHRUNGEN IN DER SCHWEIZ



---

## Zusammenfassung

Der Verlust an organischer Substanz, der bei entwässerten Torfböden stärker auftritt als bei anderen Bodentypen, wirkt sich vor allem auf die Funktionen der Landwirtschaft, der Klima- und Wasserregulierung und des Lebensraums für lebende Organismen aus. Die Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion ist mittelfristig gefährdet, und als Folge dieses Verlusts an organischer Substanz steigen die Treibhausgasemissionen. Diese Boden- und Klimaverschlechterung erfordert Massnahmen im Hinblick auf die zukünftige Nutzung der ehemaligen Moore.

Die landwirtschaftlich genutzten entwässerten Torfböden auf niedriger Höhe nehmen eine Fläche von ungefähr 9900 ha ein und befinden sich vor allem in den Kantonen Bern (Seeland, Gürbetal), St. Gallen (St. Galler Rheintal und Linthebene), Waadtland (Orbe-Ebene) und Luzern (Wauwiler Ebene). Es handelt sich um ehemalige Flachmoore, die vor allem im 19. Jh., aber auch im 20. Jh. aus gesundheitlichen Gründen, zum Schutz vor Überschwemmungen und zur landwirtschaftlichen Nutzung trockengelegt wurden. Die Ebenen unterscheiden sich hinsichtlich Torfmächtigkeit, Art des Untergrunds, der Sackungsraten und auch hinsichtlich der umgesetzten oder vorgesehenen technischen Lösungen, um den Torfvorrat zu erhalten oder wiederherzustellen. Die verschiedenen Massnahmen (Zufuhr von Biomasse, tiefe Bodenbearbeitung, Materialzufuhr auf die Oberfläche, Wiederherstellung eines vollständigen Bodens, Wiedervernässung) nützen einem oder mehreren Mechanismen des Torferhalts (Verlustrausgleich, Verlustreduzierung, Torfschutz, Stabilisierung der organischen Substanz, temporäre oder dauerhafte Torferhaltung). Die Effizienz dieser Mechanismen zur Torferhaltung reicht von gering bis hoch. Diese Zusammenfassung macht deutlich, dass sowohl die Kenntnisse von der Quantifizierung des Torfverlusts und der Treibhausgasemissionen, als auch die Effizienz von Massnahmen zur Erhaltung der organischen Substanz lückenhaft sind und kurz- und mittelfristig überwacht werden müssen. Die Auswirkungen der Mechanismen in den Bereichen Landwirtschaft, Klima, Gewässer und Biodiversität werden in den drei Szenarien «Beibehaltung der aktuellen Situation», «Teilweise Erhaltung des Torfs» und «Vollständige Erhaltung des Torfs» analysiert.

---

## Impressum

**Auftrag:** Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abt. Boden, CH-3003 Bern. Das BAFU ist ein Amt des Eidg. Departements für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).

**Autorin:** Claire Guenat (ex-EPFL) mit technischer Unterstützung von Véronique Maître (Büro pEaudSol)

**Grafik, Layout:** Claire Guenat mit der Mitarbeit von Christina Zavlanou

**Deutsche Übersetzung:** Carruzzo Traduction

## Danksagungen

Stéphane Burgos (BHF, BE), Andreas Chervet (LANAT-ASP, BE), Jean-Pierre Clément (ex-BAFU), François Füllemann (DGE, VD), Elena Havlicek (BAFU), Aline Loher (AFU, SG),

Ivana Oberhänsli (ALN-ZH), Sonja Paul (Agroscope, ZH), Chloé Würst-Galley (Agroscope, ZH).

**Hinweis:** Diese Studie/dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst. Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

# INHALTSVERZEICHNIS

1. PROBLEMATIK UND ZIELE	4
Problematik: Verlust von organischer Bodensubstanz bei entwässerten Torfböden	4
Ziele des Berichts	4
2. ENTWÄSSERTER TORFBÖDEN	5
Torfböden in Hoch- und Flachmooren: ein Erbe aus der Vergangenheit	5
Moorschwund	6
Moorebenen in der Schweiz, unterschiedlich und heterogen	6
Unterschiedliche Merkmale der Moorebenen	7
Heterogene Moorebenen	10
3. DIE ORGANISCHE SUBSTANZ UND DIE FUNKTIONEN DER TORFBÖDEN	11
Besondere Eigenschaften der organischen Substanz in Torfböden	11
Besondere Funktionen der Torfböden	12
Produktionsfunktion	13
Regulierungsfunktion	13
Lebensraumfunktion	14
Archivfunktion	14
Funktion als Rohstoffquelle	15
Antagonistische Funktionen	15
4. DIE ORGANISCHE SUBSTANZ DER TORFBÖDEN IST VOM VERSCHWINDEN BEDROHT	16
Drainage als Ursache für den Verlust an organischer Substanz in Torfböden	16
Quantifizierung des Verlusts an organischer Substanz in den Torfböden	17
Messverfahren und Einheiten	17
Ausmass der Verluste	17
Folgen des Verlusts an organischer Substanz für die Landwirtschaft und das Klima	18
5. ERHALTUNG DER ORGANISCHEN SUBSTANZ UND MASSNAHMEN BEI ENTWÄSSERTEN TORFBÖDEN EHEMALIGER FLACHMOORE	20
Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz in entwässerten Torfböden	20
Massnahmen bei entwässerten Torfböden in der Schweiz	21
Zufuhr von Biomasse: Wurzelbiomasse	21
Zufuhr von Biomasse: Pflanzenrückständen	21
Tiefe Bodenbearbeitung: Tiefpflügen	22
Tiefe Bodenbearbeitung: Tiefrotieren	23
Materialzufuhr auf die Oberfläche: Bestreuen mit Ton	23
Zufuhr von Sand oder von abgetragenem Boden (Bodenaushub)	23
Wiederherstellung eines vollständigen Bodens durch Materialzufuhr ohne anschliessende Durchmischung mit dem Torf	25
Wiederherstellung eines vollständigen Bodens durch Materialzufuhr mit Wiederaufbringen des Torfs auf die Oberfläche	26
Temporäre oder permanente Wiedervernässung	27
Welche Massnahmen zur Torferhaltung?	28
Zusammenfassung der Massnahmen	28
Lückenhafte Kenntnisse	30
6. WELCHE ZUKUNFT FÜR DIE MOOREBENEN?	31
Drei Szenarien für die Zukunft der Moorebenen	31
Szenario 1: Fortführung des heutigen Zustandes «business as usual»	32
Szenario 2: Teilweise Torferhaltung	32
Szenario 3: Vollständige Torferhaltung	32
Sektorenübergreifender Ansatz und integrierte Bewirtschaftung	33
Bibliografie	34
Abbildungsverzeichnis	35
Glossar	36

# 1. PROBLEMATIK UND ZIELE

## Problematik: Verlust von organischer Bodensubstanz bei entwässerten Torfböden

Der Verlust von organischer Bodensubstanz wirkt sich unterschiedlich auf die ökologischen Bodenfunktionen aus. Diese werden in der 2020 [1] vom Bundesrat verabschiedeten nationalen Bodenstrategie für eine nachhaltige Bewirtschaftung der Böden definiert. Besonders betroffen sind die landwirtschaftliche Produktionsfunktion, die Klima- und Wasserregulierungsfunktion und die Lebensraumfunktion für lebende Organismen. Der Verlust von organischer Bodensubstanz ist bei landwirtschaftlich genutzten, entwässerten Torfböden besonders schwerwiegend. Denn mittelfristig wird dadurch eine nachhaltige landwirtschaftliche Produktion gefährdet, besonders auf Böden, die für den Gemüsebau bestimmt sind und auf denen mehrere Kulturen pro Jahr angebaut werden. Der Verlust von organischer Bodensubstanz führt ebenfalls zu Treibhausgasemissionen (TGE). Man geht davon aus, dass landwirtschaftlich genutzte entwässerte Torfböden circa 14% der jährlich in der Landwirtschaft freigesetzten Treibhausgasemissionen ausstossen [2] [3]. Hinzu kommt, dass die aus Torfböden freigesetzten Emissionen aufgrund des Klimawandels tendenziell stärker zunehmen werden, da entwässerte Torfböden sensibel auf Temperaturanstieg und Intensivierung der Trockenheit reagieren. In einigen Regionen haben die Drainagen heute das Ende ihrer Lebensdauer erreicht und müssen unter hohen finanziellen Investitionen ersetzt oder erneuert werden. Die Bodenstrategie Schweiz empfiehlt, die Gelegenheit zu ergreifen und die zukünftige Nutzung dieser Böden zu überdenken und dabei Aspekte des Natur-, Klima- und Gewässerschutzes, sowie des Schutzes vor Naturgefahren zu berücksichtigen (strategische Stossrichtung SL14). Darüber hinaus ist es notwendig, den Verlust von Torf infolge landwirtschaftlicher Nutzung entwässerten Torfböden zu minimieren (Ziel ZL5).

## Ziele des Berichts

Ausser der Wiedervernässung sind aktuell keine wirksamen und nachhaltigen Regenerationsmassnahmen von landwirtschaftlich genutzten entwässerten Torfböden bekannt. Das unvermeidliche mittel- und/oder langfristige Verschwinden dieser Böden erfordert die Entwicklung von Leitlinien über ihre künftige Nutzung. In der Schweiz werden für entwässerte Torfböden technische Lösungen oder Massnahmen (z. B. Zufuhr von Biomasse, tiefe Bodenbearbeitung, Materialzufuhr auf die Oberfläche oder Flutung) durchgeführt oder vorgeschlagen.

**Ziele** des Berichts sind:

- Beschreibung, Ursprung und Entwicklung des Torfs in entwässerten Torfböden.
- Beschreibung der wichtigsten entwässerten Flachmoore der Schweiz.
- Beschreibung der Eigenschaften organischer Substanz in entwässerten Torfböden.
- Darstellung und Bewertung der Massnahmen, die den Vorrat an organischer Substanz in entwässerten Torfböden erhalten oder sogar wiederherstellen sollen.

Dieser Bericht befasst sich ausschliesslich mit landwirtschaftlich genutzten Torfböden, die aus Flachmooren entstanden sind. Hierbei handelt es sich um Böden, die für Acker- und Gemüsebau oder als Dauerwiesen genutzt werden. Der Umgang mit entwässerten Hochmooren wird nicht berücksichtigt.

## 2. ENTWÄSSERTETE TORFBÖDEN

### Torfböden in Hoch- und Flachmooren: ein Erbe aus der Vergangenheit

Moore sind Ökosysteme, die durch die Anwesenheit einer mehr oder weniger mächtigen Schicht aus abgestorbener organischer Substanz gekennzeichnet sind: dem Torf. Allgemein können zwei grosse Arten von Ökosystemen unterschieden werden: Hochmoore (Regenmoore) und Flachmoore (Niedermoore). Die Bildung von Mooren ist das Ergebnis einer sehr langsamen Anhäufung von Torf bis zu einer beachtlichen Mächtigkeit (von mindestens einigen Dezimetern bis zu mehreren Metern) unter praktisch permanentem Vorhandensein von Wasser, wodurch die Zersetzung der organischen Substanz verhindert wird. Die Mehrheit der Moore befindet sich in den Talsohlen und an den Fluss- oder Seeufern.

Das Ökosystem Hochmoor wird an der Oberfläche von Wasser versorgt, das ausschliesslich aus atmosphärischen Niederschlägen stammt. Der Torf ist hauptsächlich aus Moosresten (Sphagnaceae) zusammengesetzt. Dieses extreme Milieu ist sehr arm an Nährstoffen und Sauerstoff und besitzt einen sehr sauren pH-Wert. Die Flachmoore (Niedermoore) sind Biotope, die durch eine spezifische Vegetation charakterisiert sind (Binsen, Seggen, Schilfrohr) und im Gegensatz zum Hochmoor mit mineralreichem Wasser (Kalzium) versorgt werden. Dieser Torf hat generell einen beinahe neutralen pH-Wert.

Torf bildet sich nur sehr langsam - pro Jahr entsteht eine Schicht von ungefähr 0,5 bis 1 mm - und ist sehr alt. In den meisten Fällen begann die Torfbildung vor mehreren tausend Jahren (Abb. 1).

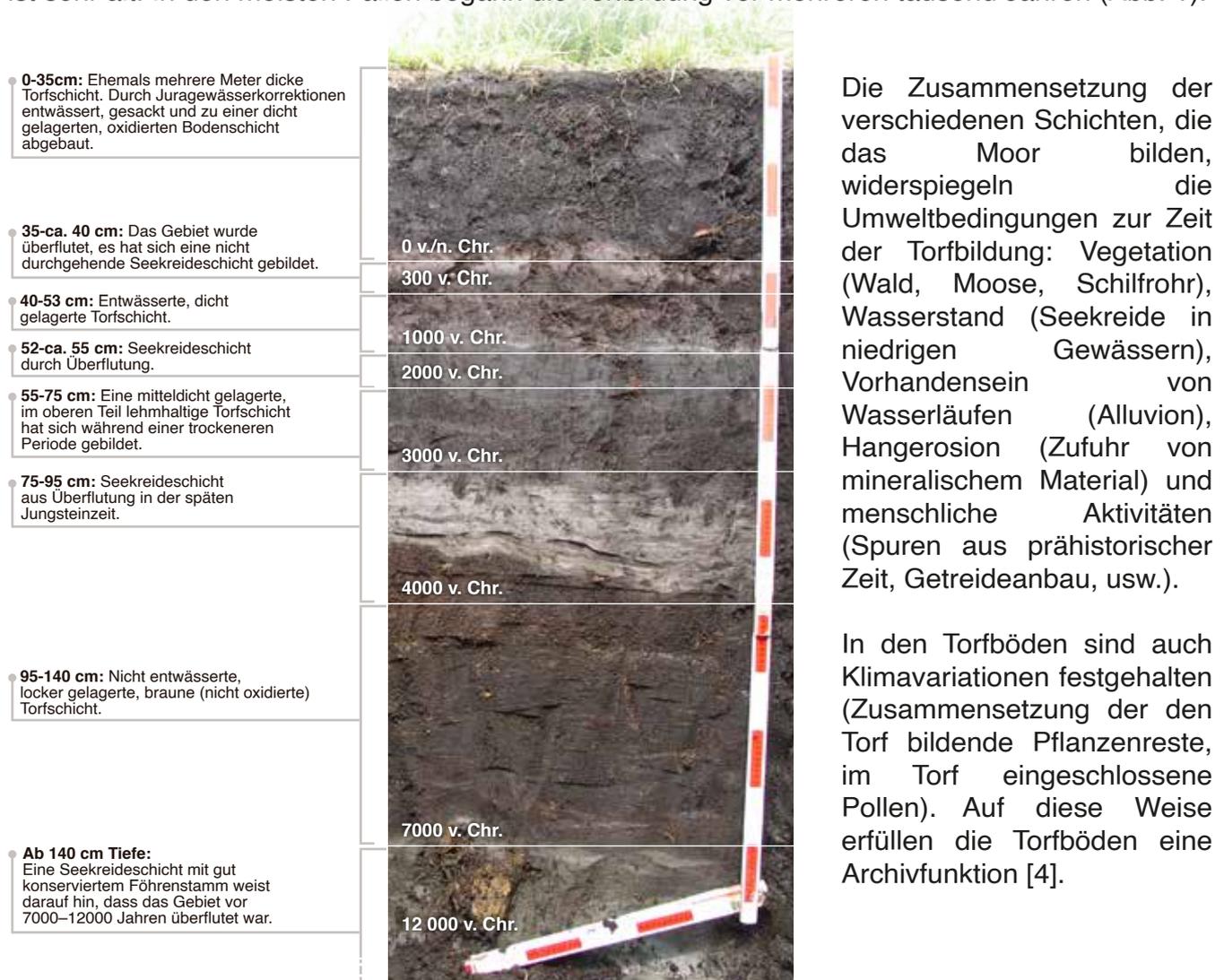
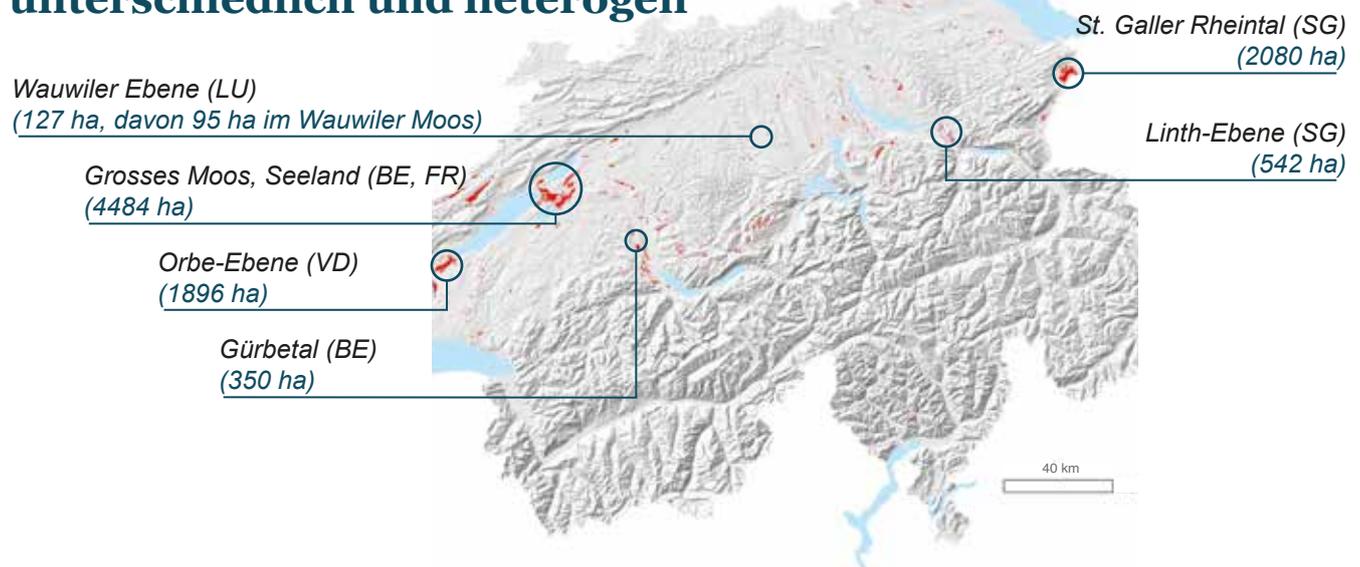


Abb. 1 : Alter des Torfs, ein Beispiel aus dem Seeland (angepasst an [4] © Chervet A., Müller M.).

## Moorschwund

In der Schweiz ist die Fläche sämtlicher Hoch- und Flachmoore sehr stark zurückgegangen. Heute sind 70 bis 80% der im Jahr 1710 erfassten Gebiete keine echten Moore mit einer standorttypischen Vegetation und Funktionsweise mehr. Der jährliche Verlust (zwischen 0.39 und 0.42% der Fläche) entspricht in etwa den Moorverlusten in Europa im gleichen Zeitraum [5]. Der drastische Rückgang von Feuchtgebieten liegt vor allem am Abbau von Torf als Brennmaterial (allgemein verbreitet in den Hochmooren) und an der Umstellung auf landwirtschaftliche Nutzflächen durch Drainage (vor allem in den Flachmooren). Der Abbau von Torf als Brennmaterial war im 18. Jh. weit verbreitet und blieb bis Anfang des 19. Jh. häufig. Später wurde die Verwendung von Torf durch Kohle verdrängt, ausser während der Versorgungsknappheit in der Zeit zwischen den beiden Weltkriegen. Die Entwässerung der Flachmoore wird seit Jahrhunderten von den Menschen praktiziert und in den meisten grossen Moorebenen angewendet. Ursprünglich war die Grabenentwässerung, die in einigen Regionen im Mittelalter ihren Anfang nahm, eine Gesundheits- (Bekämpfung von Krankheiten) und Sicherheitsmassnahme (Schutz vor Überschwemmungen und Hochwasser). Durch die grossen Meliorationen im 19. und 20. Jh. - Eindeichung und Begradigung der Wasserläufe in Kombination mit Drainage - wurde ein grosser Teil der Flachmoore in Kulturland umgewandelt. Heute wird in fast allen entwässerten Torfböden der Tiefebene Gemüse produziert oder Ackerbau betrieben. Einige Flachmoore, die sich noch nahe an einem ursprünglichen Zustand befinden, sind im Inventar für Moorlandschaften von nationaler Bedeutung aufgelistet [6].

## Moorebenen in der Schweiz, unterschiedlich und heterogen



**Abb. 2:** Lokalisierung der gesamten «organischen Böden» der Schweiz. Die «organischen Böden» umfassen drainierte und nicht-drainierte Torfmoore, Übergangsmoore und Flachmoore. Die Fläche der entwässerten Torfböden ist indikativ (Karte und Fläche angepasst an Ref.7 von Würst-Galley C.).

In der Schweiz ist die Fläche der landwirtschaftlich genutzten, aus den Flachmooren entstandenen drainierten Torfböden klein. Allerdings ist die Gesamtfläche dieser Böden wegen fehlender Daten nicht genau bekannt. Die einzige Karte mit einer Schätzung für die gesamte Schweiz stammt aus 2015 [7]. Sie enthält alle drainierten oder nicht-drainierten Torfböden, Böden in Halbmooren und in Flachmooren. Die Gesamtfläche wird auf 28'000 ha geschätzt, das sind 0,7% der Landesfläche, davon sind 18'500 ha Kulturland, Wiesen und Weiden.

Die weiträumigsten entwässerten Torfböden sind ehemalige Flachmoore, die trockengelegt wurden. Sie befinden sich vor allem in den Kantonen Bern (Seeland, Gürbetal), St. Gallen (St. Galler Rheintal und Linthebene), Waadtland (Orbe-Ebene) und Luzern (Wauwiler Ebene) in tieferen Lagen und nehmen eine Fläche von 9900 ha ein, was 35,6% der gesamten «organischen Böden» entspricht (Abb. 2).

Die anderen drainierten Torfböden bestehen aus kleinen Flächen, die über das Landesgebiet verteilt sind. Sie befinden sich im Juragebiet und in den Alpen und werden meistens als Wiesen und Weiden genutzt.

### ***Unterschiedliche Merkmale der Moorebenen***



**Abb. 3:** Grosses Moos im Seeland (BE, FR).

#### *Grosses Moos im Seeland (BE, FR)*

Das «Grosse Moos» (Abb. 3) liegt im Drei-Seen-Land (Neuenburg, Biel, Murten) und war das grösste Moor der Schweiz. Die Entstehung dieses Moors begann vor ungefähr 10'000 v. Chr. und erstreckte sich damals über etwa hundert km<sup>2</sup>. Das überflutete Gebiet beherbergte eine artenreiche Flora und Fauna, war aber wenig ertragreich und gesundheitsschädlich (Quelle für Malaria). Die Aare schlängelte sich frei durch das Moor und lagerte durch ihre veränderten Flussläufe mineralische Anschwemmungen ab. Durch das Mäandrieren der Aare verbunden mit Wasserstandsänderungen der drei Seen entstand zwischen 8'000 v. Chr. bis ungefähr 100 v. Chr. ein Mosaik von Torfböden und von mineralischen Böden. Einige Böden weisen eine bis zu drei Metern mächtige Torfschicht auf, wohingegen andere fast nur aus Ton, Sand oder Seekreide gebildet sind. Zwischen diesen beiden Extremen gibt es eine grosse Vielfalt an Zusammensetzung, die oft in einem Abstand von einigen Metern aufeinander folgen. Im 19. und 20. Jh. wurde das Grosse Moos während der zwei Juragewässerkorrekturen durch Senken des Wasserspiegels der Seen, Veränderung und Stabilisierung der Flussläufe und der Errichtung eines Geflechts aus Gräben und Drainage-Anlagen trockengelegt. Auf diese Weise wurde dieses Moor zu Kulturland umgewandelt. Diese Region befindet sich auf einer durchschnittlichen Höhenlage von 430 m und profitiert von einem für die Landwirtschaft günstigen milden Klima. Ungefähr 20% der aktuellen Gemüseproduktion in der Schweiz kommen von einer 2'500 ha grossen Fläche im Seeland [7] [8] [9] [10] [11].

## St. Galler Rheintal (SG)



Abb. 4: St. Galler Rheintal (SG).

Vor circa 15'000 Jahren war die Ebene vom Rheingletscher bedeckt. Nach seinem Rückzug haben sich Feuchtgebiete gebildet und während ungefähr 10'000 Jahren hat sich der Torf in einigen Bereichen der Ebene angehäuft. An einigen Orten ist der Torf mehrere Meter mächtig, manchmal bis zu 10 Metern. Der Torf kann von alluvialen- oder Hangablagerungen überlagert sein. Der Wasserhaushalt der Böden wurde durch verschiedene Massnahmen verändert, wie die Korrektur der Rheingewässer und die Drainage, letztere erst durch Gräben und ab 1970 mit unterirdischen Entwässerungs-Anlagen mit Pumpvorrichtung. Das St. Galler Rheintal befindet sich auf einer Höhenlage von 430 m, die Hauptanbaukultur ist Mais und es wurden auch intensiv genutzte Dauerwiesen angelegt (Abb. 4) [12][13].

### Orbe-Ebene (VD)

Die durch den Neuenburger See vom Grossen Moos getrennte Orbe-Ebene ist auf ähnliche Weise wie jenes entstanden. Auch sie war ein ausgedehntes Moor, wurde häufig überschwemmt und die Produktion bestand nur aus magerer Futtergewinnung, Torfgewinnung und Einstreu. Die Besiedlung der Ebene und ihre landwirtschaftliche Nutzbarmachung waren und werden von einem ständigen Kampf gegen überschüssiges Wasser beherrscht. Die Überschwemmungsrisiken wurden durch Fliessgewässerkorrekturen, das Ausheben von offenen Kanälen und die erste Juragewässerkorrektur stark vermindert. Bis Anfang des 20. Jh. blieb die Ebene dennoch für den Anbau ungeeignet. Durch die zwischen

1930 und 1945 generalisierte unterirdische gravitative Drainage entstanden einerseits wertvolle Landwirtschaftsböden, andererseits wurde die Nachhaltigkeit der Torfböden gefährdet: Durch Mineralisierung findet eine Torfsackung statt. Heute kommt an einigen Orten unfruchtbare Seekreide zum Vorschein. Die sich auf einer Höhenlage zwischen 433 und 447 m befindliche Orbe-Ebene profitiert von sehr günstigen Klimabedingungen für die landwirtschaftliche Produktion. Sie besteht fast ausschliesslich aus intensivem Acker- und Gemüsebau (Abb. 5, [14][15]).



Abb. 5: Orbe-Ebene (VD).

### Linthebene (SG)

Die Linthebene ist ein Ort von aufeinanderfolgenden, natürlichen und anthropogenen Wandlungen, welche die Flussläufe und Bodenfunktionen zutiefst und nachhaltig verändert haben. Vor den anthropogen verursachten Veränderungen war die Ebene ein ausgedehntes und durchgehendes Moor, das sich zwischen dem Walensee und dem Zürichsee erstreckte. Die Bevölkerung vor Ort wurde von Hochwasser, Überschwemmungen und Malaria bedroht. Um dem entgegenzuwirken, wurde seit 1807 ein nationales Projekt zur Korrektur der Linth-Gewässer erarbeitet. Das Projekt enthielt eine Änderung des Flussverlaufs und eine Kanalisierung des Flusses, namentlich durch den Escher- und den Linth-Kanal. Die entwässerten Flächen ermöglichten die Entwicklung der Region im 19. Jh. Während dem Zweiten Weltkrieg wurde die obere Hälfte der Ebene entwässert. Im unteren Teil der Linth-Ebene wurden die Arbeiten erst 1965 vollendet.

In den 2000er Jahren wurden im Rahmen des interkantonalen (St. Gallen, Schwyz, Glarus, Zürich) Projekts zum Hochwasserschutz an der Linth neue Ausbauten an den Escher- und Linth-Kanälen, wie Gräben und Sekundärkanäle, realisiert. Ein Teil des bei den Arbeiten an der Linth angefallenen Materials wurde im Rahmen des landwirtschaftlichen Projekts «Benken Plus», das in Synergie mit dem Projekt zum Hochwasserschutz durchgeführt wurde, wiederverwertet. Das Projekt umfasst eine Gesamtfläche von ungefähr 25 ha und beinhaltet die Verbesserung der entwässerten Torfböden in niedrigen Höhenlagen von circa 400 m zu landwirtschaftlichen Zwecken [16][17].

### *Gürbetal (BE)*

Im Gürbetal sind die Torfschichten mächtig, sie können mehrere Meter erreichen (3,35 m). Aufgrund der bei Hochwasser auftretenden Überschwemmungen der Gürbe enthalten die unterschiedlichen Böden des Tals manchmal beachtliche Mengen an mineralischem Material (Lehm, Ton). Auch Hangabflüsse können zu stehendem Wasser führen und den Torf bedecken. Im Gebiet von Mühlethurnen, Kirchenthurnen und Kaufdorf wurde ein in niedriger Höhenlage (circa 600 m) liegendes altes Moor drainiert und um 1920 auf der gesamten Tallänge für den Anbau erschlossen. Das Moor wird landwirtschaftlich genutzt, wobei Wiesen und Kohlanbau dominieren. Die Drainage-Systeme sind nicht mehr effizient und die Ansammlung von Oberflächenwasser ist (fast) flächendeckend, was die landwirtschaftliche Nutzung immer schwieriger macht [18][19].

### *Wauwiler Ebene (LU)*



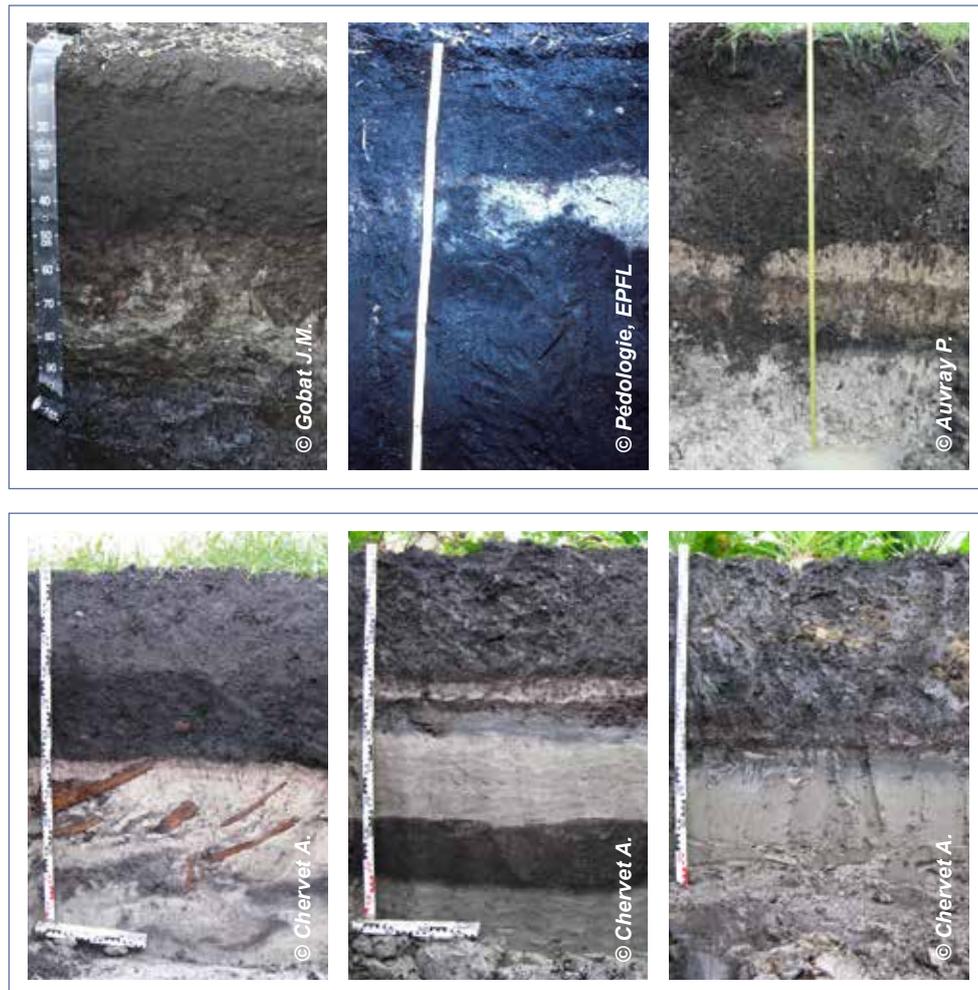
**Abb. 6:** Wauwiler Ebene (LU).

Der Untergrund besteht aus drei Materialarten: Moränen, Seekreide und See- oder Flusssedimenten. Früher machten Torfböden auf Seekreide, Moore und Halbmoore die grösste Fläche des ehemaligen Gletschersees Wauwil aus. Sie bildeten das grösste zusammenhängende Feuchtgebiet der Zentralschweiz. Diese Landschaft wurde Mitte des 19ten Jh. trockengelegt und die umliegenden Moore wurden nach und nach entwässert. Die an manchen Stellen sieben Meter mächtigen Torfschichten wurden während des Zweiten Weltkriegs abgebaut. Die frühere Ebene wurde mithilfe von Gräben und unterirdischen Drainage-Anlagen entwässert und das durch die Ebene fließende Gewässer, die Ron, wurde begradigt. Das Ziel, die sich auf circa 540 m Höhenlage befindliche Ebene trockenulegen wurde bis in die 1970er Jahre weiterverfolgt. Daraufhin nahm die Torfmächtigkeit stark ab und beträgt heute nur noch einige Dezimeter bzw. Zentimeter. In dieser Ebene sind Torfböden selten geworden. Einzig die Region um das Wauwiler Moos, das Hagimoos und den Mauesee ist noch aussergewöhnlich reich an Feuchtgebieten. Ausserdem wurden bis heute mehr als 120 archäologische Stätten in der Region vom Wauwiler See entdeckt. Die meisten prähistorischen Stätten wurden durch den Torfabbau und die Trockenlegung zerstört oder stark beschädigt. Diese offene Landschaft ist die wichtigste und weiträumigste im Kanton Luzern. Die kleinen Seen, Weiher, Feuchtgebiete und Flachmoore wechseln sich mit den intensiv genutzten Agrarflächen mosaikartig ab. Dank der Landschaftsqualität und dem Vorhandensein von ökologischen Standorten (u.a. das Naturschutzgebiet Wauwiler Moos) und von archäologischen Stätten wurden 1'700 ha in das nationale Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler aufgenommen. Das Gebiet der Wauwiler Ebene zählt zu den bedeutendsten Fundstätten aus der Steinzeit in Zentraleuropa. Vor kurzem wurde im Rahmen vom Entwicklungsprozess ländlicher Raum (ELR) ein Projekt zur landwirtschaftlichen Planung vorgeschlagen. Es geht darum, verschiedene Interessen - landwirtschaftliche Produktion, Natur- und Landschaftsschutz und Naherholung - miteinander zu vereinbaren (Abb.6), [6][20][21][22][23].

## Heterogene Moorebenen

Zu der Variabilität jeder Moorebene kommt eine Heterogenität innerhalb jedes Torfbodens hinzu. Die entwässerten Torfböden setzen sich nicht aus einer einzigen Humusform zusammen, sondern aus einer Abfolge von verschiedenen Formen von organischer Substanz, in der sich die Entwicklung der Pflanzen, des Wasserhaushalts und der menschlichen Aktivitäten im Laufe der Zeit widerspiegelt (Abb. 7).

Die entwässerten Torfböden in der Schweiz unterscheiden sich also in der Art und Mächtigkeit des Torfs voneinander, aber auch durch das Vorhandensein und die Art von - unter oder über dem Torf eingeschobenem - mineralischem Material. Diese Variabilität zeigt sich auch innerhalb jeder Ebene (Abb. 7) und innerhalb jeden Bodens (Abb. 1). Die räumliche Verteilung der verschiedenen Torfböden ist schwer vorherzusehen, da sie von den lokalen Bedingungen abhängt.



**Abb. 7:** Diversität der Torfböden zwischen entwässerten Moorebenen und innerhalb einer entwässerten Moorebene: Orbe-Ebene (oben); Seeland (unten).

Bei jedem Projekt zur Bewirtschaftung der entwässerten Torfböden muss diese Variabilität berücksichtigt werden. Es ist unbedingt notwendig, eine an die spezifischen Situationen angepasste Bewirtschaftung zu erarbeiten und den ursprünglichen Zustand (vor der Bewirtschaftung) ganz genau zu kennen. Das erfordert eine Feinkartierung (mit einer optimalen Auflösung von 1/5000) mit einer an die entwässerten Torfböden angepassten Methodik. Die aktuelle Methode [24] ist nicht auf entwässerte Torfböden ausgerichtet. In einigen Gebieten der Rheinebene wird diese feine Kartierung schon angewandt. Im Kanton Bern wurden nur pedologische Bohrungen durchgeführt. Mit einer Klassifikation können die Ursachen für die Einschränkungen der landwirtschaftlichen Bodennutzung bestimmt werden. Daraufhin können Massnahmen vorgeschlagen werden, mit denen vor allem die landwirtschaftliche Produktion erhalten bzw. verbessert werden soll; sie können auch für andere Bodenfunktionen interessant sein [25][26][27].

### 3. DIE ORGANISCHE SUBSTANZ UND DIE FUNKTIONEN DER TORFBÖDEN

#### Besondere Eigenschaften der organischen Substanz in Torfböden



Die organische Substanz bildet den Hauptbestandteil der entwässerten Torfböden. Die Merkmale und Eigenschaften dieser organischen Substanz unterscheiden sich sowohl quantitativ (Vorrat), als auch qualitativ (Zusammensetzung und Stabilität) von denjenigen der kultivierten mineralischen Böden (Abb.8).

**Abb. 8:** Vergleich zwischen einem landwirtschaftlich genutzten entwässerten Torfboden (links) und einem landwirtschaftlich genutzten Mineralboden (rechts).

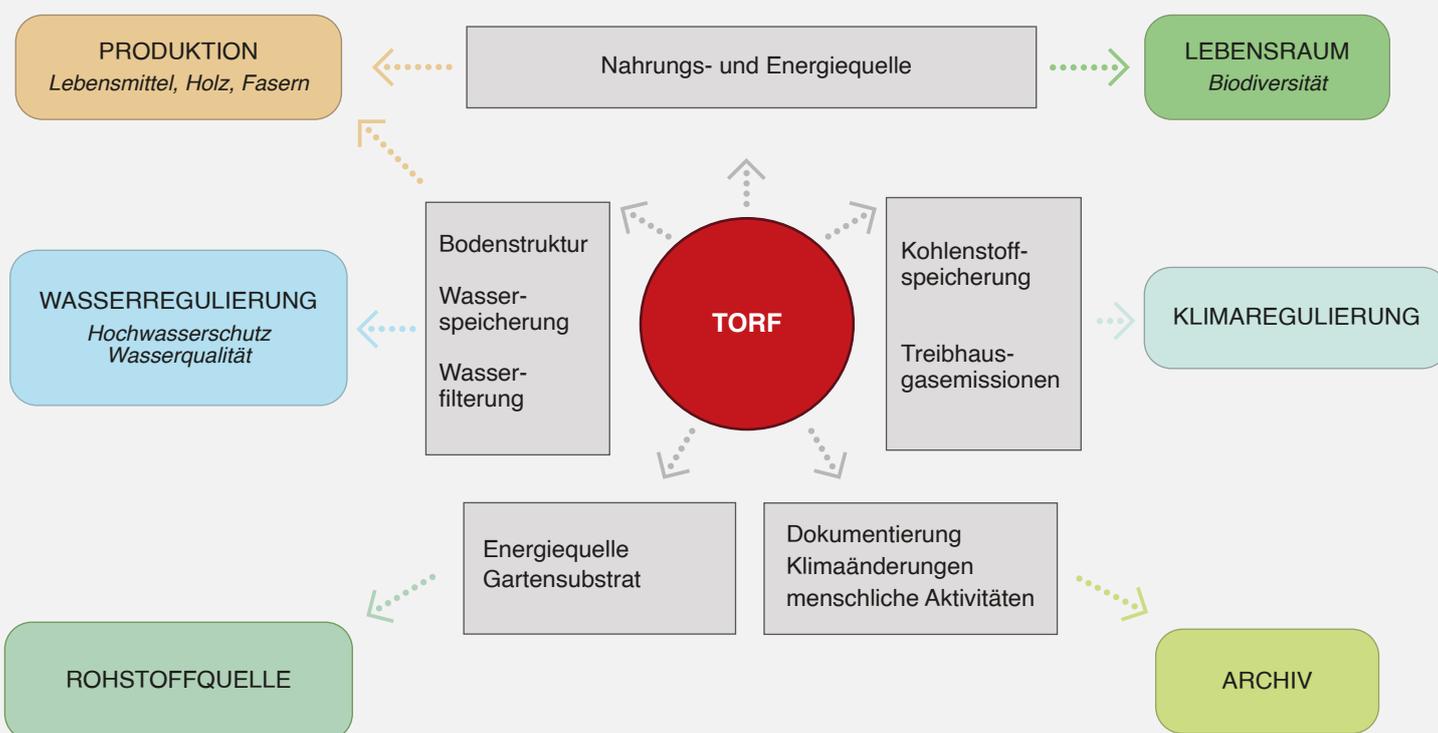
Der Torf von entwässerten Torfböden weist folgende besondere Eigenschaften auf:

- **Eine schwarze und homogene Farbe** in den oberflächennahen Horizonten, oder eine rotbraune Farbe mit erkennbaren Pflanzenresten in den tieferliegenden Horizonten in der Nähe des Grundwassers.
- **Eine Zusammensetzung auf der Basis von Torf**, einer Substanz, die sich unter nahezu permanenter Anwesenheit von Wasser durch Anhäufung und Umwandlung von Pflanzenresten aus für Feuchtgebiete und Gewässern, d.h. für Moore, typischen Pflanzenarten (Schilf, Segge, Moose) gebildet hat. Die Torfbildung endet bei Vorhandensein von Luft infolge von Entwässerung.
- **Einen sehr viel höheren Vorrat an organischem Kohlenstoff** als in den Mineralböden. Dieser Vorrat ergibt sich sowohl aus der höheren Konzentration als auch aus der grösseren Mächtigkeit der organischen Schichten in entwässerten Torfböden, welche hauptsächlich, wenn nicht ausschliesslich, aus Torf bestehen (mindestens 50% des Trockengewichts in entwässerten Torfböden, maximal 10% in landwirtschaftlich genutzten Mineralböden).
- **Eine im gesamten entwässerten Torfboden vorhandene, sehr mächtige Torfschicht** (mindestens 50 cm, bis zu mehreren Metern). In landwirtschaftlich genutzten Mineralböden konzentriert sich die organische Substanz auf die Oberbodenschicht (ungefähr 20 cm).
- **Einen nicht erneuerbaren Vorrat an organischer Substanz:** aufgrund der Unterbrechung der Torfbildung und dem beträchtlichen und schnellen Torfverlust als Folge der Entwässerung ist der Vorrat an organischer Substanz in den entwässerten Torfböden eine nicht erneuerbare Ressource.

- **Bei Vorhandensein von Luft ist Torf eine sehr instabile organische Substanz:** Torf mineralisiert schnell, wenn er durch Entwässerung mit Sauerstoff in Kontakt kommt. Dieser Umwandlungsprozess ist schneller und intensiver als bei den Mineralböden. Ist keine mineralische Substanz vorhanden, wird der Torf weder mittel- noch langfristig als Humus stabilisiert, der die wichtigste Form von stabilisierter organischer Substanz in den Mineralböden darstellt.
- **Sie ist eine wichtige Nährstoffquelle:** bei der schnellen Mineralisierung werden Nährstoffe freigesetzt, von denen ein Teil temporär gebunden wird und den landwirtschaftlichen Nutzpflanzen zur Verfügung steht.
- **Sie ist mit dem Grundwasser verbunden:** In der Regel bleibt bei den entwässerten Torfböden trotz der Drainagen eine Verbindung zum Grundwasser bestehen. Diese Verbindung ermöglicht den Austausch von Wasser, Nährstoffen und eventuell auch Schadstoffen.
- **Je nach Grundwasserstand ist sie eine Quelle von mehreren Treibhausgasen:** Kohlendioxyd (CO<sub>2</sub>), Methan (CH<sub>4</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O), deren Flüsse von der Wassersättigung der organischen Substanzen abhängen.

## Besondere Funktionen der Torfböden

Aufgrund ihrer Eigenschaften und ihrer Menge spielt die organische Substanz in den Torfböden eine zentrale Rolle für die in der nationalen Bodenstrategie definierten ökologischen (Produktions-, Regulierungs- und Lebensraumfunktion) und sozio-ökonomischen Bodenfunktionen (Archiv- und Rohstofffunktion) (Abb. 9). Diese Funktionen hängen im Wesentlichen vom Vorhandensein von Wasser, dem durchschnittlichen Wasserstand und der Verweildauer des Wassers im Boden ab.



**Abb. 9:** Eigenschaften, sowie ökologische und sozio-ökonomische Bodenfunktionen von entwässerten Torfböden.

## Produktionsfunktion

### Landwirtschaftliche Produktionsfunktion

Die organische Substanz ist eine wichtige Quelle für die Beschreibung der Fruchtbarkeit von entwässerten Torfböden. Sie verleiht den Böden eine sehr hohe physikalische und chemische Fruchtbarkeit. Für die Aufwertung und die Produktionskapazität der Böden ist eine angepasste Wasserversorgung erforderlich. Unter günstigen Klimabedingungen und bei einer ebenen Topographie weisen drainierte organischen Böden eine hervorragende landwirtschaftliche Nutzungseignung mit einer Punktzahl zwischen 65 bis 75 von 100 Punkten auf (Abb. 10, [24]).

Die aus drainierten Flachmooren gewonnenen landwirtschaftlich genutzten Torfböden sind vor allem für den Gemüse- oder Ackerbau (Mais, Randen, Kohl, usw.) geeignet und werden oft intensiv bewirtschaftet. Ein Beispiel hierfür sind die Orbe Ebene (VD), das Seeland (BE, FR), der sogenannte «Gemüsegarten der Schweiz» und das Gürbetal (BE), auch «Chabisland» genannt. Im Zusammenhang mit der Schweizer Ernährungssicherheit ist diese ertragreiche landwirtschaftliche Produktionsquelle sowohl von regionaler als auch von nationaler Bedeutung. Bei weniger günstigen Klimabedingungen werden die entwässerten organischen Böden als Dauerwiesen zur Futtergewinnung genutzt.



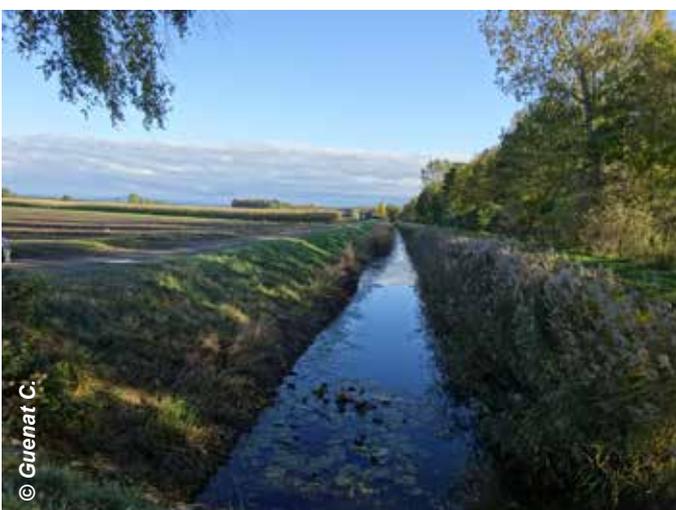
**Abb. 10:** Landwirtschaftliche Produktion.

### Forstwirtschaftliche Produktionsfunktion

Die feuchten und sumpfigen Nasswälder der Flachmoore sind wegen der seit dem Mittelalter massiven Rodungen zum Gewinn von Weiden und Ackerland praktisch verschwunden. Diese aus Weiden, Birken und Erlen zusammengesetzten ursprünglichen Wälder sind nicht sehr ertragreich und ihre Bewirtschaftung ist wenig rentabel. Als Folge der Entwässerung sind heute nur noch Restbestände in geschützten Landschaften von nationaler Bedeutung übriggeblieben. In entwässerten Moorebene findet man nur noch gepflanzte Baumreihen (Pappeln). Sie tragen zur Trockenlegung der Ebene bei, stellen einen Windschutz dar und werden als Teil der Landschaftsstruktur angesehen.

## Regulierungsfunktion

### Wasserregulierungsfunktion



**Abb. 11:** Wasserregulierung.

Der Torf der Flachmoore spielt eine wichtige Rolle als Wasserspeicher und trägt dazu bei, Überschwemmungen zu begrenzen. Aber durch die Entwässerung und Sackung wird der Grundwasserstand direkt beeinflusst, was die Bedeutung des Torfs reduziert (Abb. 11).

Die organische Substanz ist ein effizienter Filter für bestimmte Schadstoffe (z.B. Schwermetalle). Andererseits kann die schnelle Zersetzung von Torf zu einer starken Bildung von Nitrat und Phosphaten führen, die über das Drainagesystem und/oder der Verbindung des Bodens mit dem Grundwasser eine Eutrophierung des Wassers zur Folge hat.

### Klimaregulierungsfunktion

Bei Torfböden verursacht die aus Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N) zusammengesetzte organische Substanz die Emission von drei Treibhausgasen - von Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ), Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Lachgas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) - deren Klimawirkung sich in Richtung  $\text{CO}_2 < \text{CH}_4 < \text{N}_2\text{O}$  erhöht. Die Proportion dieser verschiedenen Treibhausgase, sowie deren Flüsse hängen von den Umgebungsbedingungen im Torfboden ab, besonders vom Wassersättigungsgrad, der seinerseits vom Grundwasserstand bestimmt wird (Abb. 12, Abb. 13).

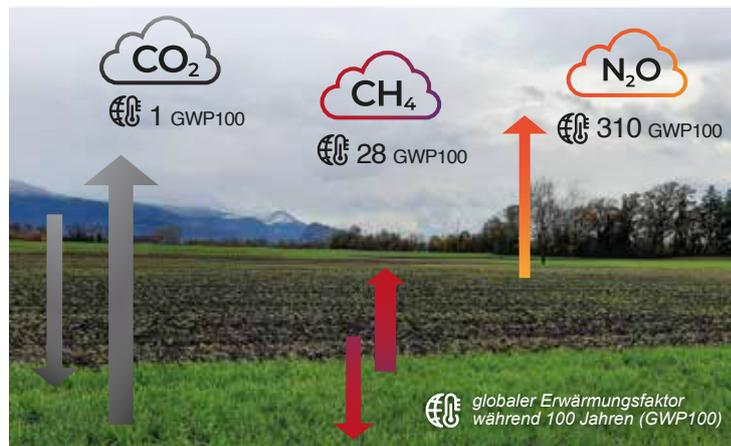


Abb. 12 : Klimaregulierung.

In natürlich gewachsenen Torfböden wird  $\text{CO}_2$  gebunden und nur wenig  $\text{CH}_4$  emittiert. Bei stark drainierten Torfböden sind die  $\text{CO}_2$ -Emissionen maximal und gehen mit gemässigten  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen einher. Eine Wiedervernässung gleicht die  $\text{CO}_2$ -Flüsse aus. Bei steigendem Grundwasserstand liegen die  $\text{CH}_4$ -Emissionen nahe dem natürlichen Zustand und bei Flutung sind sie am höchsten.

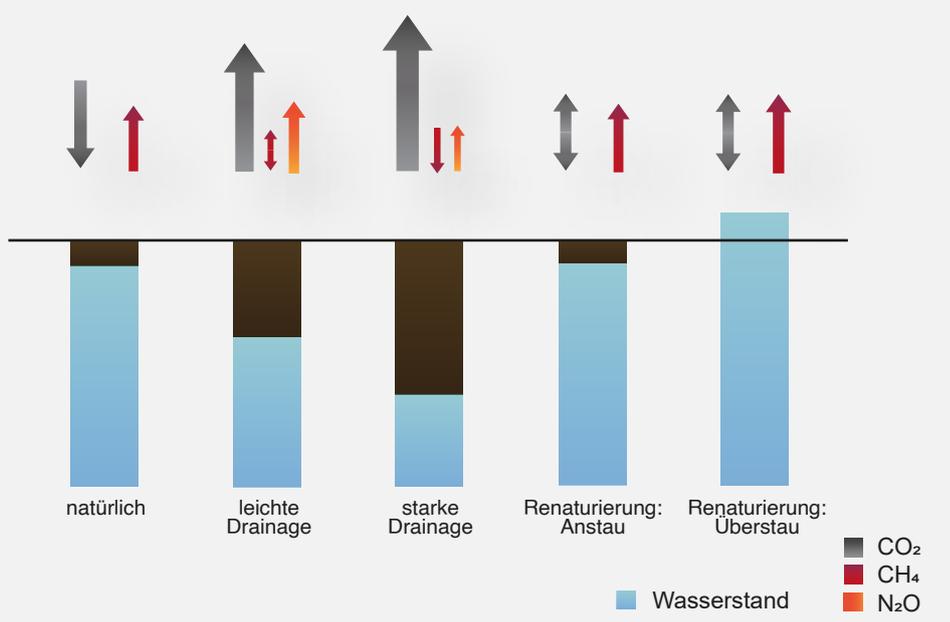


Abb. 13: Einfluss des Wasserstands auf Treibhausgasemissionen in organischen Böden (aus Ref. [3] angepasst).

### Lebensraumfunktion

Naturnahe Hoch- und Flachmoore bieten günstige Lebensräume für eine grosse Anzahl und Vielfalt an Lebensformen auf engem Raum. Sie sind Hochburgen der Biodiversität. In der Schweiz befinden sich ungefähr ein Viertel der vom Aussterben bedrohten Pflanzenarten in den Hoch- und Flachmooren von nationaler Bedeutung; das entspricht 0,5% der Landesfläche. Die stark spezialisierten Arten der Tier- und Pflanzenwelt reagieren empfindlich auf Umweltveränderungen, besonders auf Trockenlegung und Zufuhr von Nährstoffen. Alle diese Arten sind als Folge der Drainage und der Düngung aus den entwässerten Moorebenen verschwunden.

### Archivfunktion

Die Funktion als Archiv für Naturgeschichte (Entwicklung von Vegetation, Tierwelt und Klima) und als Archiv der menschlichen Aktivitäten zeigt sich vor allem in nicht-drainierten Torfböden. Der fehlende oder unvollkommene Abbau der organischen Substanz ermöglicht die Konservierung von natürlichen Resten (zum Beispiel Pollen, Pflanzenreste) und menschlichen Relikten (zum Beispiel Kleidung, Nahrung, Holzwerkzeuge). Aus der allmählichen Anhäufung von Torf und natürlichen und menschlichen Spuren entsteht ein «Geschichtsbuch» der vergangenen Umwelten, das von der Klimaentwicklung bis zu den aufeinanderfolgenden Zivilisationen erzählt.

## Funktion als Rohstoffquelle

Torf wurde zuerst als Brennstoff genutzt, später als Gartensubstrat. Seit dem 18. Jahrhundert wurde Torf wegen einem Mangel an Brennholz, das selten und teuer gewordenen war, als Brennstoff genutzt, um dem zunehmenden Bedarf der Bevölkerung und der Industrie nachzukommen. Deshalb erhielt Torf eine wichtige ökonomische Bedeutung und stellte eine Alternative zum Abholzen der Wälder dar. Der Abbau war in den Hochmooren massiver als in den Flachmooren. Er erreichte seinen Höchststand in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts und verringerte sich dann durch Importe von anderen Brennstoffen wie Kohle und Gas. Zwischen den beiden Weltkriegen gewann der Torfabbau erneut an Bedeutung. Der Abbau von Torf als Brennstoff hat in sämtlichen Mooren zu einem Rückgang an Moorfläche, einhergehend mit einem Kohlenstoffverlust, geführt. Dieser Verlust wird auf 2,5 bis 5,7 Millionen Tonnen seit 1710 geschätzt.

Als Gartensubstrat wurde Torf zwischen 1940 und 1990 genutzt. Davon waren hauptsächlich die Hochmoore betroffen.

Seit der Rothenturm-Initiative von 1987 ist der Abbau von Torf als Brennstoff oder als Gartensubstrat in «Mooren und Moorlandschaften von besonderer Schönheit und von nationaler Bedeutung» [28] verboten.

## Antagonistische Funktionen

Vereinfacht gesagt sind die jeweils optimalen Wasserbedingungen für die verschiedenen Bodenfunktionen (Produktion, Lebensraum, Wasser- und Klimaregulierung) antagonistisch (Abb. 14). Ein tiefer mittlerer Wasserstand ist fast nur für die landwirtschaftliche Nutzung im Acker- und Gemüsebau von Vorteil, hingegen weniger vorteilhaft für die Lebensraum- und die Wasser- und Klimaregulierungsfunktionen.

Funktion	Niedriger Wasserstand	Hoher Wasserstand
Acker- und Gemüsebau	Optimal	Unangemessen
Lebensraum	Geringe Biodiversität	Vorkommen von spezialisierten Arten
Wasserregulierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwasserdämpfung</li> <li>• Bindung von Schadstoffen</li> <li>• Risiko einer Verschlechterung der Wasserqualität (Bildung von Nitrat und Phosphaten)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hochwasserdämpfung</li> <li>• Keine Bindung von Schadstoffen</li> <li>• Kein Risiko einer Verschlechterung der Wasserqualität durch Bildung von Nitrat und Phosphaten</li> </ul>
Klimaregulierung	CO <sub>2</sub> - und N <sub>2</sub> O-Emissionen	CH <sub>4</sub> -Emissionen

**Abb. 14:** Einfluss des Wasserstands auf die antagonistischen Funktionen der Torfböden.

## 4. DIE ORGANISCHE SUBSTANZ DER TORFBÖDEN IST VOM VERSCHWINDEN BEDROHT

### Drainage als Ursache für den Verlust an organischer Substanz in Torfböden



*Abb. 15: Torf in einem nicht entwässerten Flachmoor (links); Torf in einem entwässerten Torfboden (rechts).*

Durch das Entwässern bzw. das Sinken des Wasserstands erfährt die Dynamik der organischen Substanz eine irreversible und schnelle Veränderung (Abb. 15). Dieser plötzliche Übergang zu sauerstofffreien (aufgrund des Wasservorkommens) zu aeroben Bedingungen führt zu:

- › Einem sofortigen Abbruch der Torfbildung.
- › Einer Verringerung der CO<sub>2</sub>-Bindung aus der Luft und der Speicherung von Biomasse.
- › Einer Sackung (Absenken des Bodenniveaus): die Torfsackung ist das Ergebnis der kombinierten Wirkung aus der Setzung und der Schrumpfung des Torfs, zwei Prozesse, denen die Mineralisierung der organischen Substanz und ein sekundärer Prozess, das Auswaschen der organischen Substanz ins Wasser, folgen. Langfristig trägt vor allem die Mineralisierung zur Torfsackung bei, aber ihr Beitrag schwankt von Fall zu Fall (von 35 bis 100%).
- › Einer Veränderung der Torfzusammensetzung (weniger Fasern, dunklere Farbe): zudem wird der Torf etwas stabiler und lässt sich nur schwer wieder befeuchten.
- › Einer Veränderung der Zersetzungsprozesse der organischen Substanz und der Treibhausgasemissionen: Wechsel von der anaeroben Fermentierung mit Methanbildung zur aeroben Mineralisierung und erhöhter Kohlendioxidproduktion.

Über die Entwässerung hinaus können auch wiederholte mechanische Bodenbearbeitung und Winderosion einen Verlust an organischer Substanz verursachen. Die Bodenbearbeitung fördert die Durchlüftung und somit die Mineralisierung des Torfs. Das Winderosionsrisiko erhöht sich, wenn der Boden ausgetrocknet ist (Sommertrockenheit) oder wenn er nicht durch eine Pflanzendecke oder einen Windschutz geschützt ist.

# Quantifizierung des Verlusts an organischer Substanz in den Torfböden

## Messverfahren und Einheiten:

Die Verluste werden geschätzt anhand von:

- Historischen Inventaren der Moorflächen, Nutzung der entwässerten Torfböden und Änderungen der Torfmächtigkeit. Mit dieser Methode sind keine genauen Angaben zur Verringerung des Kohlenstoffvorrats in den entwässerten Torfböden möglich.
- **Sackung:** Ein zuverlässiger Indikator, mit dem die Verlustmenge einfach, aber nur annähernd quantifiziert werden kann. Die Sackung wird in Mächtigkeit pro Zeiteinheit ausgedrückt (z. B. in Metern/100 Jahre).
- **Abnahme des Torfvorrats.** Er wird in Verlust an organischer Substanz/ha/Jahr oder in Verlust an C/ha/Jahr ausgedrückt.
- **Monitoring der aktuellen gasförmigen Emissionen** (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O) zur Abschätzung der aktuellen Verluste. Die Ergebnisse werden entweder in jährlichen Emissionen für jedes einzelne Treibhausgas oder als CO<sub>2</sub>-Äquivalent/Jahr ausgedrückt. Zur Berechnung der Bilanz werden die Speicherung und die Emissionen von jedem einzelnen Gas oder von allen Gasen zusammen berücksichtigt.
- **Isotopensignatur.** Mit ihr kann identifiziert werden, welche organische Substanz dem Verlust zugrunde liegt (z.B. Torf oder kürzlich zurückliegender Pflanzenbewuchs).

Aufgrund der Variabilität zwischen und innerhalb der einzelnen Moorebenen können aus den erhaltenen Daten keine allgemeinen Schlüsse von einem Standort auf andere Standorte gezogen werden [29]. Aktuell ist es nicht möglich, den Verlust an organischer Substanz in den entwässerten Torfböden der Schweiz zuverlässig vorherzusagen.

## Ausmass der Verluste:

Es gibt in der Schweiz nur wenige quantitative Daten zum Verlust an organischer Substanz in den entwässerten landwirtschaftlich genutzten Torfböden, die aus ehemaligen Flachmooren entstanden sind. Die Sackung ist ein schneller und irreversibler Vorgang. Sie beträgt zwischen 0,5 m bis 1,8 m pro Jahrhundert. Das Ausmass variiert je nach Gebiet und auch innerhalb einer Moorebene. Diese Abweichungen lassen sich durch klimatische Unterschiede (Niederschlagsmenge und Temperatur), vor allem aber durch Unterschiede bodenkundlicher Natur (Torfeigenschaften, Vorhandensein von mineralischem Material), im Wasserhaushalt (Grundwasserstand und Sickerleistung), sowie in der landwirtschaftlichen Nutzung erklären (Abb.16).

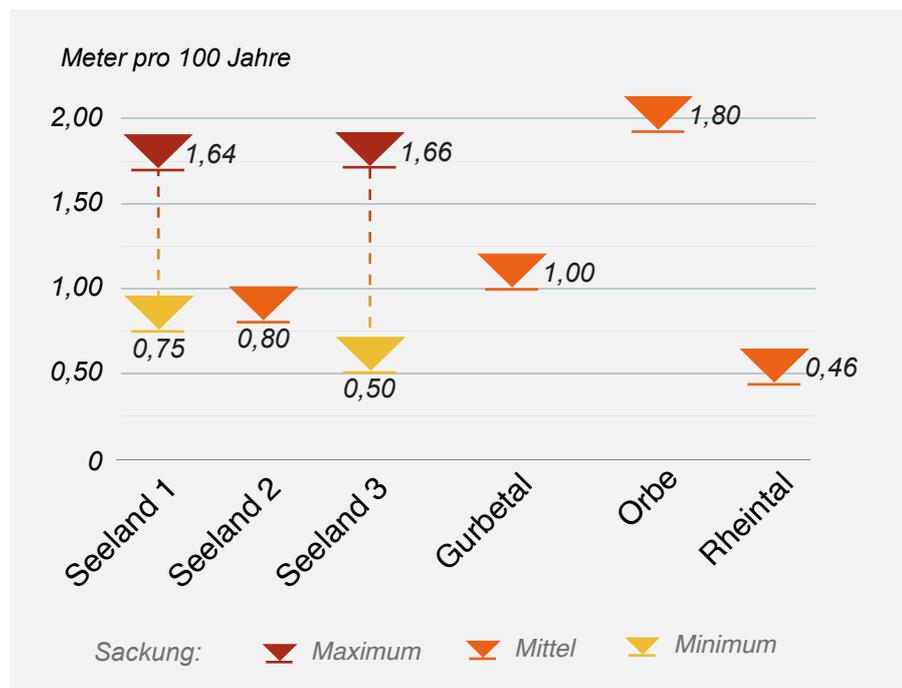
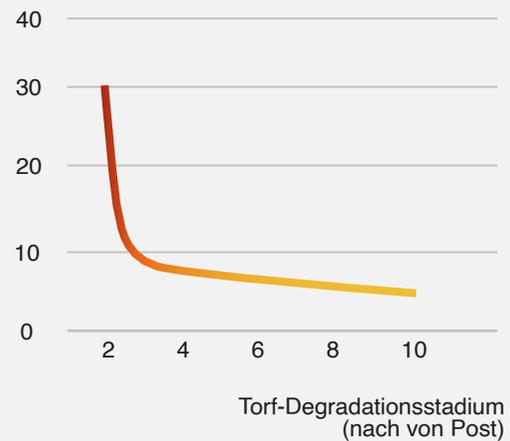


Abb. 16: Torfsackung in Moorebenen. Daten aus [29], [30], [10], [19], [15], [31].

Die Geschwindigkeit der Torfumwandlung und der folgenden Mineralisierung hängt auch vom Zersetzungsgrad des Torfs ab. Der Zersetzungsgrad kann mit dem von Post Index geschätzt werden. Unter gleichen Bedingungen mineralisiert sich ein wenig zersetzter Torf (von Post Index maxi) schneller als ein stark zersetzter Torf (von Post Index mini) (Abb. 17).

Abbaubarkeit der organischen Substanz pro Jahr (% des Gesamt-C)



**Abb. 17:** Abbau der organischen Substanz von organischen Böden nach dem von Post Index (angepasst nach [3]).

Die Kohlenstoffverluste in den entwässerten Torfböden variieren je nach Moorebene. In den Weiden im Seeland liegen sie bei 4,6 t/ha/Jahr bis 5 t/ha/Jahr und in den Weiden im Rheintal bei etwa 0,62 t/ha/Jahr [10][32]. Zudem variiert der Verlust an Kohlenstoff je nach Wasserstand, hydrologischen Bedingungen, Vegetation und landwirtschaftlicher Bewirtschaftung. Auch die intensive Düngung erhöht den Verlust an Kohlenstoff und die CO<sub>2</sub>-Emissionen [33].

Diese Verluste sind deutlich höher als die Verluste in den mineralischen Böden, selbst bei intensiver landwirtschaftlicher Nutzung (0,34 t C/ha/Jahr). Sie sind 2- bis 15-mal höher als die Kohlenstoffverluste der mineralischen Böden [3].

## ***Folgen des Verlusts an organischer Substanz für die Landwirtschaft und das Klima***

Der Verlust an organischer Substanz wirkt sich auf alle Bodenfunktionen aus. Im Fall der entwässerten Torfböden, die aus Flachmooren entstanden sind, betrifft dieses Problem vor allem die landwirtschaftliche Produktionskapazität und die Treibhausgasemissionen, die beide direkt vom Wasserstand im Torf abhängen.

### *Verringerung der landwirtschaftlichen Produktionskapazität*



**Abb. 18:** Auftreten von ungünstigen Schichtfolgen nahe der Oberfläche: Seekreideschicht (links), wenig durchlässige Stauschicht (rechts).

Durch den Verlust an organischer Substanz kann je nach ursprünglicher Torfmächtigkeit tief liegendes mineralisches Material zum Vorschein kommen. Daraufhin sinkt die Bodenfruchtbarkeit generell, aber aus unterschiedlichen Gründen, die von den Eigenschaften der mineralischen Schichten (Kreide, Sand, Alluvionen, Lehm, Ton) abhängen. Die Limitierungen der landwirtschaftlichen Produktionskapazität können hydrischen (Wasseransammlungen an der Oberfläche) und/oder chemischen Ursprungs sein (Nährstoffverarmung bis hin zu Nährstoffmangel, Toxizität). Wenn die Torfmächtigkeit weniger als 20 cm beträgt, ist Ackerbau nicht mehr möglich und andere landwirtschaftliche Nutzungen müssen in Betracht gezogen werden (Wiesland oder alternative Anbaukulturen). Der Verlust an organischer Substanz und die daraus resultierende Torfsackung können innerhalb einer Parzelle variieren und durch die so entstandene heterogene Fläche eine landwirtschaftliche Bewirtschaftung erschweren.

Durch die Torfsackung werden die Drainagesysteme funktionsunfähig, weil sie sich nicht mehr in der erforderlichen Tiefe befinden. Wegen der Bodensenkung liegen die Drainagen immer näher an der Oberfläche, die Böden werden nur noch ungenügend entwässert und es besteht ein höheres Überschwemmungsrisiko.

In einigen Fällen würden die veralteten Entwässerungssysteme eine neue Sanierung erfordern. Aber die Kosten einer solchen Erneuerung sind beachtlich. Das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) schätzt diese im Durchschnitt auf 25'000 Franken/ha.

Im Seeland würde sich ein Drainagesystem mit einer Wasserstandsregulierung durch Pumpen in 30 bis 50 Jahren rentieren [34].



Abb. 19: Über dem Boden liegender Drainage-Schacht.

### *Treibhausgasemissionen als Folge des Verlusts an organischer Substanz*

Hauptgrund für die Torfmineralisierung und somit für die Treibhausgasemissionen ist die Entwässerung. Schätzungsweise setzen die landwirtschaftlich genutzten entwässerten Torfböden 0,7 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro Jahr (äq/J) frei, das sind 1,5% der gesamten Treibhausgasemissionen der Schweiz [2] und entspricht ungefähr 14% der Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft [3].

Allerdings ist die genaue Menge der von den entwässerten Torfböden (Hoch- und Flachmoore) freigesetzten Treibhausgasemissionen kaum dokumentiert, vor allem nicht für CH<sub>4</sub> und N<sub>2</sub>O. Bisher hat sich die Forschung auf die Hochmoore konzentriert. Aber die Wissenschaftler haben auf die Bedeutung der drainierten landwirtschaftlich genutzten Torfböden für die Treibhausgasemissionen aufmerksam gemacht. Aktuell gibt es nur wenige Versuche zur Quantifizierung dieser Emissionen, besonders nicht zu N<sub>2</sub>O [35][36]. Die ersten Forschungen wurden im Seeland an drainierten Torfböden aus ehemaligen Flachmooren unter extensiv genutzten Weiden durchgeführt. Im Fall einer extensiv genutzten Weide über einem entwässerten Torfboden bewegen sich alle Treibhausgasemissionen in einer Grössenordnung von 20 t CO<sub>2</sub> äq/ha/J. Hauptanteil der Emissionen ist CO<sub>2</sub>, während die Freisetzung von N<sub>2</sub>O schwach (3 t CO<sub>2</sub> äq/ha/J [33]) und die von CH<sub>4</sub> sehr schwach (0,2 t CO<sub>2</sub> äq/ha/J) ist.

# 5. ERHALTUNG DER ORGANISCHEN SUBSTANZ UND MASSNAHMEN BEI ENTWÄSSERTEN TORFBÖDEN EHEMALIGER FLACHMOORE

In der Schweiz stammen die ältesten beschriebenen Massnahmen von landwirtschaftlich genutzten Torfböden aus den 1970er Jahren. Wichtigstes Ziel der Massnahmen war der Erhalt der landwirtschaftlichen Produktion, für die es unerlässlich ist, erstens über eine für die Wurzelentwicklung ausreichende Bodenmächtigkeit zu verfügen, zweitens die Tragfähigkeit des Bodens zu verbessern, damit er besser befahrbar wird und drittens für einen optimalen Wasserhaushalt zu sorgen. Die Zielsetzungen in Zusammenhang mit dem Erhalt der organischen Substanz und die Klimawirkung sind neuere Anliegen. Die vorausgehenden Ausführungen zu den Mechanismen zur Erhaltung organischen Substanz in entwässerten Torfböden helfen, die Funktionsweisen der Massnahmen besser zu verstehen und die Wirksamkeit zur Erhaltung der organischen Substanz in entwässerten Torfböden zu bewerten.

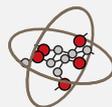
## Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz in entwässerten Torfböden

Sechs Hauptmechanismen zum Erhalt der organischen Substanz in entwässerten Torfböden wurden identifiziert (Abb. 20). Durch die verschiedenen Massnahmen werden entweder eine oder mehrere dieser Mechanismen umgesetzt.



### Ausgleich des Torfverlusts

Die Verluste werden durch Zufuhr von pflanzlicher Biomasse ausgeglichen. Diese Biomasse befindet sich entweder auf der Bodenoberfläche (Ernterückstände) oder im Boden (Wurzelabbau).



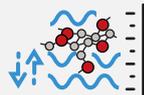
### Stabilisierung des Torfs

Der Torf wird durch die Zufuhr von Ton stabilisiert, weil aus Ton und organischer Substanz Verbindungen entstehen, welche die Zersetzung der organischen Substanz verlangsamen.



### Reduzierung des Torfverlusts

Wenn dem Torf mineralische Materialien beigemischt werden, verringert sich die Torfmenge, die bearbeitet und der Luft ausgesetzt wird. Es handelt sich hierbei nicht wirklich um einen Erhaltungsmechanismus, aber mit einer solchen Verdünnung kann die der Zersetzung ausgesetzte Torfmenge reduziert werden.



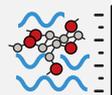
### Schaffung günstiger Bedingungen für die temporäre Torfkonservierung

Durch einen temporären Grundwasseranstieg befindet sich der Torf zeitlich begrenzt in einem ähnlichen Zustand, wie zum Zeitpunkt der Torfbildung: Abwesenheit von Sauerstoff durch Vorhandensein von Wasser. Mit dieser Wiedervernässung wird die Mineralisierung von organischer Substanz vorübergehend verhindert.



### Torfschutz

Durch die Zufuhr von mineralischem Material werden die physikalisch-chemischen Bedingungen im Torf (Feuchtigkeit, Temperatur, Durchlüftung) verändert und die biologische Aktivität und somit die Zersetzungsgeschwindigkeit vom neu geschaffenen Bodensubstrat modifiziert. Je nach Zusammensetzung der zugeführten Materialien, ihrer Mächtigkeit und den lokalen Bedingungen kann sich die Torfmineralisierung verlangsamen oder nicht.



### Schaffung günstiger Bedingungen zur permanenten Torfkonservierung

Durch einen permanenten Grundwasseranstieg werden dauerhaft ähnliche Bedingungen geschaffen, wie zum Zeitpunkt der Torfbildung: Abwesenheit von Sauerstoff durch ständige Anwesenheit von Wasser. Mit dieser Wiedervernässung wird die Mineralisierung von organischer Substanz definitiv verhindert.



Abb. 20: Sechs Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz in Torfböden.

## Massnahmen bei entwässerten Torfböden in der Schweiz

Bis auf eine wurden alle nachfolgend beschriebenen Massnahmen in der Schweiz angewendet. Sie werden in folgende Gruppen eingeteilt:

- Zufuhr von Biomasse: Ernterückstände oder Wurzelbiomasse
- Tiefe Bodenbearbeitung: Tiefpflügen und tiefes Umgraben
- Materialzufuhr auf die Oberfläche: Bestreuen mit Ton
- Zufuhr von mineralischen Materialien (Sand oder Bodenaushub) auf die Bodenoberfläche
- Wiederherstellung eines vollständigen Bodens durch Materialzufuhr mit oder ohne Wiederaufbringen des Torfs auf die Bodenoberfläche.
- Wiedervernässung: temporäres oder permanentes Fluten.

### Zufuhr von Biomasse: Wurzelbiomasse



Abb. 21: Chinaschilf (*Miscanthus*).

**Technik:** Der Aufbau von organischer Substanz im Boden wird durch die Zersetzung von Wurzelresten starkwüchsiger Pflanzen, wie Chinaschilf (*Miscanthus giganteus*) gefördert (Abb. 21).

**Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz:** Die Verluste sollen durch Zufuhr von aus der Zersetzung von Wurzelbiomasse entstandener organischer Substanz ausgeglichen werden.

**Ursprüngliches Ziel der Massnahmen:** Produktion von Biomasse für Bioenergie.

**Effizienz:** Im Seeland hat der während zehn Jahren erfolgte Anbau von Chinaschilf (*Miscanthus giganteus*) auf einem entwässerten Torfboden den Vorrat an organischer Bodensubstanz, im Vergleich mit einem ähnlichen, unter Dauergrünland liegendem Boden, nicht wesentlich erhöht. Es ist also eher unwahrscheinlich, dass die Anhäufung von frischem Chinaschilf-Material den durch die Mineralisierung verursachten Verlust kompensiert. Die Effizienz dieser Massnahmen zur Torferhaltung ist demnach gering [38].

### Zufuhr von Biomasse: Pflanzenrückstände

**Technik und Ziele:** Durchführung von Laborstudien. Um zu testen, wie sich die Zufuhr von Stroh auf die Entwicklung der organischen Substanz auswirkt, wurde eine Laborstudie durchgeführt. Die Proben stammten von Torf aus dem Seeland, der entweder unter Wald, unter Dauergrünland oder unter Maisanbauflächen lag.

**Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz:** Durch Zufuhr von organischer Substanz auf die Bodenoberfläche sollen die Verluste ausgeglichen werden.

**Effizienz:** Der Labortest zeigt, dass das Hinzufügen von Stroh (2%) die Zersetzung der organischen Substanz (Torf und Stroh) je nach Fall entweder erhöht, verringert oder gar nicht beeinflusst. Im spezifischen Fall von drainiertem und durch jahrzehntelangen Anbau von Kulturpflanzen (Mais) stark verändertem Torf würde der Zusatz von Stroh die Mineralisierung der organischen Substanz (Torf, Stroh und Maisreste) verlangsamen. Generell ist diese Massnahme jedoch wenig effizient [37].

## Tiefe Bodenbearbeitung: Tiefpflügen

**Technik:** Beim Tiefpflügen wird ein bis zu 2 Metern tief unter dem Torf befindliches mineralisches Untergrundmaterial an die Oberfläche befördert. Danach wird der Oberflächenshorizont (bestehend aus Torf und durch das Tiefpflügen hochgehobenes mineralisches Material) durch ein oberflächliches, ungefähr 20 cm tiefes Bearbeiten intensiv vermischt (Abb. 22).



Abb. 22: Vereinfachte Darstellung vom Tiefpflügen des Bodens (angepasst nach [39]).

**Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz:** Der Torfverlust wird reduziert und der Torf physikalisch geschützt. Der Torf wird mit den mineralischen Materialien «verdünnt». Nach den verwendeten landwirtschaftlichen Kriterien sollte der optimale Gehalt an organischer Substanz zwischen 2 und 10% liegen. Durch das Tiefpflügen wird der Kontakt des Torfs mit Sauerstoff verringert und somit der Zersetzungsprozess verlangsamt.

**Ursprüngliches Ziel der Massnahme:** Ziel der tiefen Bodenbearbeitung ist der Erhalt der landwirtschaftlichen Produktion. Auf diese Weise soll ein für die Entwicklung der bestehenden Kulturen (Acker – und Gemüsebau) günstiges Substrat hergestellt werden.

**Beispiel:** Diese Massnahme wurde in den 80er Jahren im Seeland mit speziellen Maschinen ausgeführt. Das durch das Tiefpflügen hochgehobene mineralische Material war Sand.



Abb. 23: Tiefpflügen. Links (vorher) – Referenzprofil ohne Tiefpflügen (Zustand 2014), der Boden besteht aus einer 25 cm mächtigen Torfschicht (Gehalt an organischer Substanz 42%) und befindet sich über einem mineralischen Untergrund. Rechts (nachher) - Profil mit 1982 durchgeführtem Tiefpflügen (Zustand 2014). Die Wirkung des Tiefpflügens ist bis zu 90 cm zu sehen (ein Teil des Torfs wurde untergepflügt); nach 30 Jahren Anbau von Kulturen haben sich die mineralischen Schichten und die Torfschicht im Oberflächenshorizont vermischt. (Der Gehalt an organischer Substanz ist acht Mal geringer als im Oberflächenshorizont des Referenzbodenprofils) [39].

**Effizienz:** 30 Jahre nach dem Tiefpflügen wurde eine Bewertung der Auswirkungen des Tiefpflügens auf die Produktionsleistung durchgeführt, unter Anwendung der an entwässerte Torfböden angepassten Kriterien der landwirtschaftlichen Nutzungseignung (NEK) aus FAL 24. Dabei ist die organische Substanz nur eins von mehreren Kriterien (neben Gründigkeit, Wasserhaushalt, usw.). Nach dieser Bewertung hat der Anteil an organischer Substanz im Oberboden das angestrebte Ziel erreicht [39]. Die Auswirkungen auf die tatsächliche Torferhaltung sind schwer zu quantifizieren. Nach aktuellem Kenntnisstand der Wissenschaft werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen, d.h. die Mineralisierung von Torf, durch das Tiefpflügen nicht modifiziert. Demnach wird das Tiefpflügen als nicht sehr effizient eingeschätzt, um den Torf zu erhalten [36].

## Tiefe Bodenbearbeitung: Tiefrotieren

**Technik:** Wie beim Tiefpflügen wird beim Tiefrotieren ein Teil des unter dem Torf liegende mineralische Material an die Oberfläche gehoben (Abb. 24). Anders als beim Tiefpflügen reichen die rotierenden Werkzeuge weniger tief in den Boden, im Durchschnitt nur ungefähr 40 cm.



Abb. 24: Vereinfachte Darstellung vom Tiefrotieren des Bodens (angepasst nach [39]).

**Ziele:** Die Zielsetzungen der beiden Methoden sind ähnlich. Allerdings ist der Torferhalt beim Tiefrotieren noch ineffektiver als beim Tiefpflügen, denn beim Durchmischen wird durch die Fragmentierung und Durchlüftung des Torfs die Mineralisierung erhöht.

## Materialzufuhr auf die Oberfläche: Bestreuen mit Ton

Das Bestreuen des Torfs mit einer geringen Schicht aus reinem Ton hat zum Ziel, den Torf vor der Mineralisierung zu schützen und die Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Dabei handelt es sich um eine physikalisch-chemische Stabilisierung des Torfs. Das Bestreuen mit Ton wird zwar in der Schweiz nicht praktiziert, ist aber erwähnenswert, weil es sehr effizient ist. In den Niederlanden zeigen Laborversuche, dass das Hinzufügen von Ton in geringer Menge (entsprechend einer 1 cm dicken Schicht auf der Fläche) den Zersetzungsprozess und die aus der Torfmineralisierung resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen verringert. Allerdings variiert die Wirkung einer solchen Zugabe beträchtlich, je nach Tonart bzw. Torf und lokalen Bedingungen (Klima, Grundwasserstand). Von Ausnahmen abgesehen führt die Tonzufuhr zu einer Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen (bis maximal 50%) [40].

## Zufuhr von Sand oder von abgetragenem Boden (Bodenaushub)

Diese meliorative Massnahme ist in der Schweiz sehr verbreitet und wird aktuell in den meisten Moorebenen (z.B. Orbe-Ebene, im Seeland und im St. Galler Rheintal) umgesetzt.

**Technik:** Die Wahl der Variante (Zufuhr von Sand oder von Bodenaushub) hängt von der Torfmächtigkeit, der Topographie der Zusammensetzung des Unterbodens, dem Grundwasserstand und vor allem von der Verfügbarkeit von abgetragenem Boden ab. Nach dem Auftrag kann das Material mit dem Torf vermischt werden (Abb. 25).

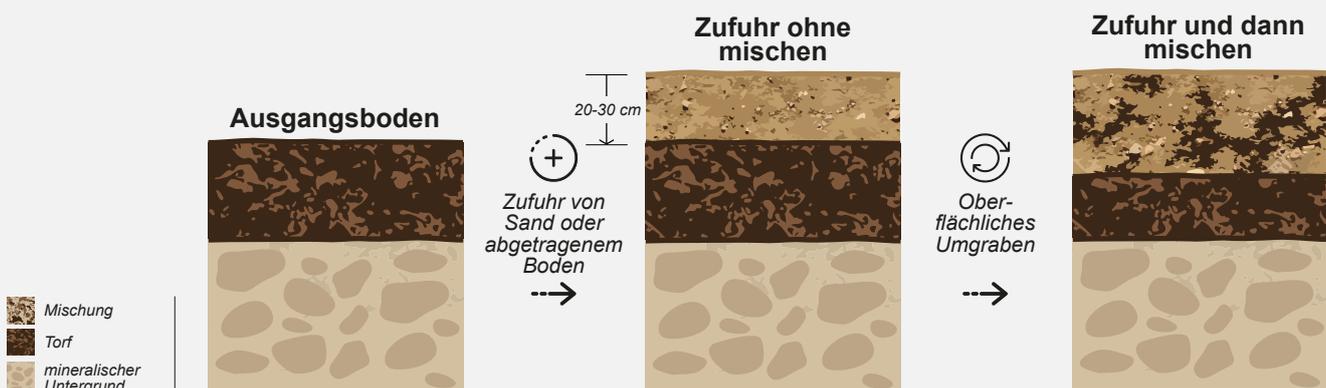


Abb. 25: Vereinfachtes Schema zur Materialzufuhr (angepasst an [39]).

**Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz:** Sie unterscheiden sich je nach Variante: Torfstabilisierung, physikalischer Torfschutz, Torfverlust vermindern. Je nach Variante treten sie kombiniert auf.

*Bei einer Überschüttung mit Sand:* ohne Vermischung vom Sand mit dem Torf ist der Erhalt der organischen Substanz nur ein physikalischer Schutz; bei Vermischung vom Sand mit dem Torf handelt es sich um eine einfache Verdünnung.

*Bei einer Überschüttung mit Bodenaushub:* das Vorhandensein von Ton trägt zusätzlich zur Stabilisierung der organischen Substanz bei.

**Ziel der Massnahme:** Wichtigstes Ziel ist der Erhalt der landwirtschaftlichen Produktionsfunktion. Bei einer landwirtschaftlichen Massnahme ist nicht der Erhalt der Torfschicht das oberste Ziel, sondern der Torf hilft, ein für die landwirtschaftliche Produktion geeignetes neues Bodensubstrat zu bilden. Die mit der pflanzennutzbaren Gründigkeit, einem zu hohen Wassergehalt und der Tragfähigkeit des Bodens zusammenhängenden Limitierungen der Produktionsfunktion sind im Allgemeinen vorrangig.

Übrigens bietet sich diese Massnahme für eine Verwertung von abgetragenem Boden und Aushubmaterial an.

### Beispiel:



**Abb. 26:** Überschüttung mit Sand ohne Durchmischung mit dem Torf. Links (vorher): Referenzprofil ohne Massnahme (Zustand 2014), der Boden entspricht einem tiefgründigen Torfboden, der Oberbodenhorizont ist reich an organischer Substanz (Gehalt an organischer Substanz 26%). Rechts (nachher): Bodenprofil nach 1971 erfolgter Zufuhr von Sand ohne Vermischung (Zustand 2014). Nach 40 Jahren landwirtschaftlicher Nutzung weist der Oberbodenhorizont einen Gehalt an organischer Substanz von 4.7% auf und ist durch einen hohen Sandgehalt gekennzeichnet (83%) [39].

**Effizienz der Überschüttung mit Sand für den Torferhalt:** Nach aktuellem Kenntnisstand werden die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Torf, d.h. die Mineralisierung der organischen Substanz, durch eine Überschüttung mit Sand nicht modifiziert. Demnach wäre eine Zufuhr von Sand für den Torferhalt nicht sehr effizient [36].

**Effizienz der Überschüttung mit abgetragenem Boden für den Torferhalt:** Sie ist nur sehr wenig dokumentiert. Die einzige Beurteilung stützt sich auf ein Beispiel aus dem St. Galler Rheintal. Es handelt sich um eine intensiv genutzte Wiese mit Materialzufuhr (eine 40 cm mächtige Schicht, zusammengesetzt aus Sand 31,8%, Schluff 52,3% und Ton 15,9%). Nach mehr als 10 Jahren hat sich der Gesamtverlust an Kohlenstoff im Boden durch die Materialzufuhr nicht signifikant verringert (um etwa 0,5 t/ha/Jahr). Die Torfverluste entstehen, sowohl mit als auch ohne Materialzufuhr, einerseits aus der Torfmineralisierung und andererseits aus der Mineralisierung der neueren organischen Substanz (Wiese). Dennoch verringert sich durch diese Massnahme die Zersetzung des alten Torfs. Längerfristig gesehen könnte es demnach eine Tendenz zur Reduzierung des Torfverlusts geben, aber diese Hypothese bleibt zu überprüfen [31].

## Wiederherstellung eines vollständigen Bodens durch Materialzufuhr ohne anschliessende Durchmischung mit dem Torf

**Technik:** Ziel dieser Massnahme ist die Wiederherstellung eines vollständigen und über 60 cm mächtigen Bodens mit externem Material (wenn möglich ausgehobenem Boden), das auf einen entwässerten Torfboden aufgebracht wird. So wird der Torf konserviert und beteiligt sich praktisch nicht mehr an der Entwicklung der angebauten Pflanzen (Abb. 27).

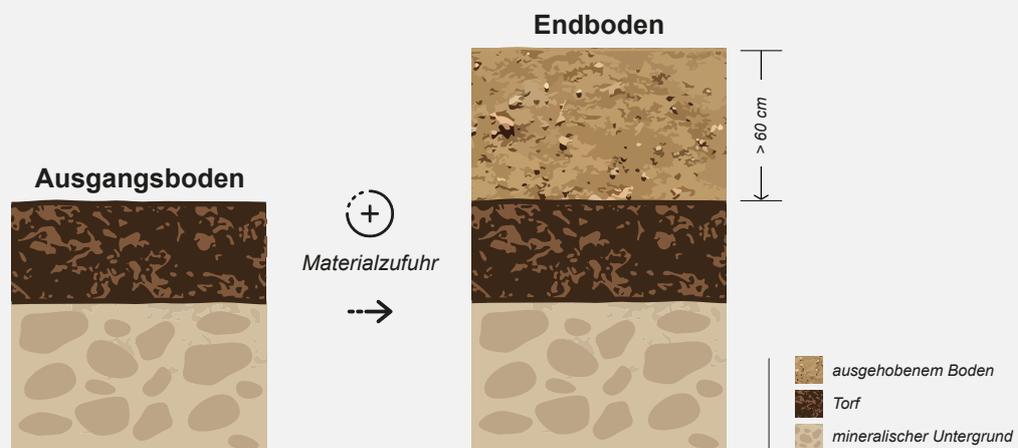


Abb. 27: Vereinfachte Darstellung einer kompletten Wiederherstellung eines Bodens durch Materialzufuhr.

### Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz:

Der Prozess der Torferhaltung hängt vom Grundwasserstand auf der Höhe des überschütteten Torfs ab: physikalischer Schutz, wenn sich der Torf über dem Grundwasser befindet, provisorische Konservierung, wenn sich der Torf temporär im Grundwasser befindet und definitive Konservierung, wenn sich der Torf permanent im Grundwasser befindet.

### Ziel der Massnahme:

Das Hauptziel ist der Erhalt der landwirtschaftlichen Produktionsfunktion und eine Erleichterung der Bewirtschaftung. Bei dieser Massnahme ist der Torferhalt nur das sekundäre Ziel. Es geht in erster Linie um die Verbesserung des Wasserhaushalts und die Erhöhung der Tragfähigkeit des Bodens. Übrigens bieten sich diese Massnahme für eine Verwertung von abgetragenen Boden und Aushubmaterial an.

### Beispiel:

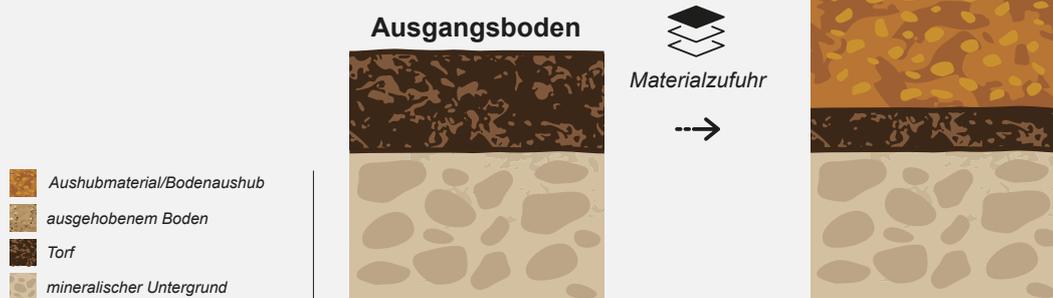
Diese Massnahme wurde während der Projekte zum Hochwasserschutz an der Linth in Synergie mit dem landwirtschaftlichen Aufwertungsprojekt Benken Plus durchgeführt. Mit diesen Projekten konnte der bei den Arbeiten an der Linth angefallene Bodenaushub (Tongehalt > 30%) aufgewertet werden. Es fand eine Nachkontrolle zu den Auswirkungen der Materialzufuhr statt, um deren Effizienz für die Produktionsfunktion der Böden zu überprüfen. Hierbei konnte festgestellt werden, dass aufgrund der Materialeigenschaften negative Auswirkungen auf den Wasserhaushalt auch noch nach fünf Jahren festzustellen sind.

### Effizienz der Wiederherstellung eines vollständigen Bodens ohne anschliessende Durchmischung mit dem Torf:

Die Effizienz des Torferhalts bei überschüttetem Torf ist nicht dokumentiert. Sie ist gering, wenn sich der Torf über dem Grundwasser befindet, mittelhoch, wenn er sich nur temporär im Grundwasser befindet und hoch bzw. dauerhaft, wenn sich der Torf permanent im Grundwasser befindet.

## Wiederherstellung eines vollständigen Bodens durch Materialzufuhr mit Wiederaufbringen des Torfs auf die Oberfläche

**Technik:** Bei dieser Massnahme wird der Torf teilweise oder vollständig abgetragen, dann wird das Aushubmaterial oder der Bodenaushub zugeführt und zum Schluss wird der Torf auf dieses mineralische Material geschüttet. Falls es sich anfangs um eine mächtige Torfschicht gehandelt hat, verbleibt noch Torf unter dem eingebauten Boden (Abb. 28).



**Abb. 28:** Vereinfachtes Schema zur Wiederherstellung eines vollständigen Bodens mit Wiederaufbringen des Torfs an die Bodenoberfläche.

### Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz:

Der Torf an der Oberfläche kann keinen Mechanismus zur Erhaltung nutzen. Im Fall eines unvollständigen Torfabtrags hängt der Mechanismus zum Erhalt des tiefliegenden Torfs vom Grundwasserstand ab.

### Ziel der Massnahme:

Das Hauptziel ist der Erhalt einer landwirtschaftlichen Produktionsfunktion und eine Erleichterung der Bewirtschaftung. Zudem bietet sich diese Massnahme für eine Verwertung von abgetragenem Boden und Aushubmaterial an.

### Beispiel:



**Abb. 29:** Wiederherstellung eines vollständigen Bodens mit Wiederaufbringen des Torfs auf die Oberfläche (während der Arbeiten). Der Torf wurde abgetragen (im Vordergrund) und wird beim wiederhergestellten Boden als Oberboden-Horizont verwendet. Im Hintergrund sieht man ein längliches Torfdepot.

**Effizienz der Wiederherstellung eines vollständigen Bodens mit Wiederaufbringen des Torfs an die Oberfläche:** Aufgrund des Umgangs mit dem Boden (Bodenabtrag, Zwischenlagerung und Wiederaufbringen) und dem anschliessenden permanenten Kontakt des Torfs mit der atmosphärischen Luft beschleunigt diese Massnahme den Torfabbau. Die Entwicklung des im Boden verbliebenen Torfs hängt vom Grundwasserstand ab.

## Temporäre oder permanente Wiedervernässung

**Technik:** Es gibt verschiedene Varianten der Wiedervernässung, die von der Überflutungsdauer (temporär oder permanent) und dem Wasserstand (Grundwasseranstieg mässig oder bis nahe an die Oberfläche, Überflutung) abhängen (Abb. 30).

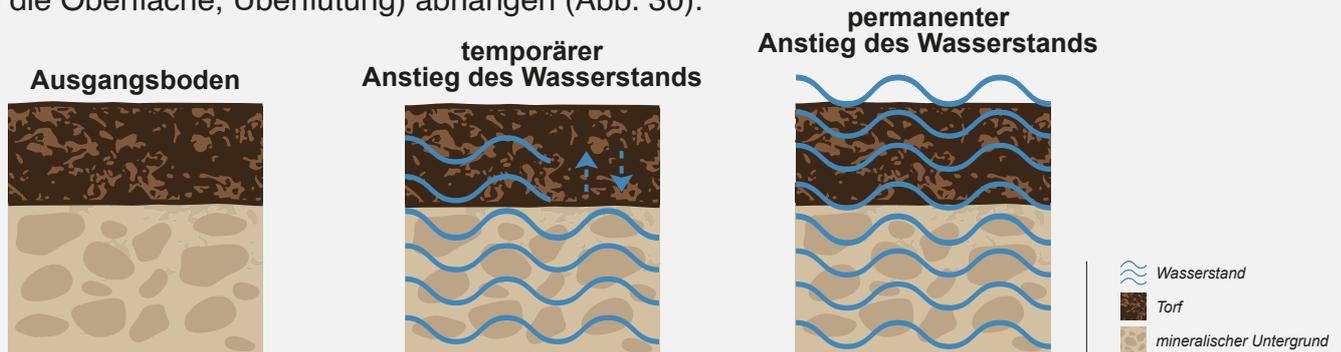


Abb. 30: Vereinfachte Darstellung der temporären oder permanenten Wiedervernässung.

### Mechanismen zur Erhaltung der organischen Substanz:

Es sollen temporäre oder permanente Bedingungen zur Konservierung des Torfs geschaffen werden.

**Ziel der Massnahme:** Die Ziele ändern sich je nach Variante:

- Traditionelle landwirtschaftliche Produktion und Biodiversität in Einklang bringen: temporäre Erhöhung des Grundwasserstands mit Hilfe des Drainagesystems.
- Alternative landwirtschaftliche Produktion und Biodiversität: temporäre Erhöhung des Grundwasserstands bis an die Bodenoberfläche.
- Klimaregulierung und Biodiversität: permanenter Grundwasseranstieg.

### Temporäre Erhöhung des Grundwasserstands und traditionelle landwirtschaftliche Produktion

In der Schweiz wird gelegentlich der kontrollierte und saisonabhängige Grundwasseranstieg angewendet. Ermöglicht wird dies durch Drainagesysteme, die mit einem Steuerungssystem zur Regelung des Grundwasserstands ausgestattet sind. Auf diese Weise können die traditionelle landwirtschaftliche Produktion und der Torferhalt durch alternierende landwirtschaftliche Bodennutzung verbessert werden.

Diese Praxis ist in der Schweiz nicht dokumentiert. In England durchgeführte Tests zeigen, dass eine Erhöhung des Grundwasserstands im Winter (von -50 auf -30 cm) die Kopfsalatproduktion nicht reduziert. Während der Vegetationsperiode hat der Grundwasserstand keine bedeutende Auswirkung auf die landwirtschaftliche Produktion. Bei einer ganzjährigen Erhöhung des Grundwasserstands hingegen verringert sich die Kopfsalatproduktion um 37%. Unter Berücksichtigung der Treibhausgasemissionen wird die Wiedervernässung im Winter als ein guter Kompromiss angesehen, mit der sowohl der Gemüsebau aufrechterhalten, als auch die Treibhausgasemissionen verringert werden können.

### Temporäre Flutung um traditionelle landwirtschaftliche Produktion und Biodiversität zu vereinbaren

Mit dieser Massnahme soll sowohl die traditionelle landwirtschaftliche Produktion als auch der Erhalt der Biodiversität ermöglicht werden. Es soll ein temporärer Rastplatz für Limikolen (Watvögel) geschaffen werden. Die durch ein Drainagesystem mit Pumpanlage durchgeführte Flutung findet im Herbst und/oder Frühling während ca. 3 Monaten statt [41]. Diese Massnahme ist aus ornithologischer Sicht erfolgreich, aber sein Einfluss auf den Torferhalt ist nicht dokumentiert.



Abb. 31 : Temporäre Flutung im Herbst zur Schaffung eines Limikolen-Rastplatzes (Orbe-Ebene).

## *Temporäre Flutung um alternative landwirtschaftliche Produktion und Biodiversität zu vereinbaren*

In den entwässerten Torfböden (Seeland, (Abb.32), Orbe-Ebene) wurden Pilotversuche zum Reisanbau durchgeführt. Diese Nischenkultur benötigt eine temporäre, vier- bis fünfmonatige Vernässung. Mit dieser Massnahme erhöht sich lokal die Biodiversität (Amphibien, Libellen, usw.) [42]. Ihre Effizienz bei der Erhaltung organischer Substanz ist sicherlich hoch, wurde aber in den Pilotprojekten nicht quantifiziert [36]. Die THG-Emissionen wurden noch nicht gemessen.



**Abb. 32:** Pilotversuch von Reisanbau im Seeland.

## *Permanenter Grundwasseranstieg*

Im Rahmen eines Massnahmenplans zur Bekämpfung der Treibhausgasemissionen schlägt der Kanton Zürich vor, einige Feuchtgebiete bis 2025 wieder unter Wasser zu setzen. Diese Massnahme betrifft Moore, extensiv genutzte Wiesen, aber auch einen Teil der landwirtschaftlich genutzten entwässerten Torfböden. Bei Letzteren sollen die Drainagesysteme nicht mehr instandgesetzt werden und die Flächen in extensiv genutzte Wiesen umgewandelt werden.

Der Einfluss des permanenten Grundwasseranstiegs auf die organische Substanz und auf die Treibhausgasemissionen ist nur in einigen wenigen, vor kurzem erschienenen Veröffentlichungen dokumentiert. Simulationen haben ergeben, dass die Treibhausgasemissionen um ungefähr 1% der weltweiten anthropogenen Emissionen reduziert werden könnten, wenn man das Grundwasser in allen landwirtschaftlich genutzten entwässerten Torfböden (aus ehemaligen Flach- und Hochmooren) anheben würde. Für diesen Grundwasseranstieg müsste man die Mächtigkeit des von der Drainage beeinflussten Torfs um die Hälfte verringern. Aus Sicht des Klimas wäre für die aktuell landwirtschaftlich genutzten Gebiete und Weiden ein durchschnittlicher Flurabstand von 10 cm optimal. Die Entwicklung von wassertoleranten Kulturen, die ökonomisch tragfähig und an den Anbau auf entwässerten Torfböden angepasst sind, hat im internationalen Bemühen im Kampf gegen den Klimawandel hohe Priorität [44].

In der Schweiz setzt die Gesamtheit der entwässerten Torfböden auf einer Fläche von circa 20'000 Hektaren aktuell pro Jahr ungefähr 700'000 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente an Treibhausgasen frei. Würde man eine Wiedervernässung bei ungefähr einem Zehntel bis zu einem Drittel der betroffenen Böden durchführen und zusätzlich einer sehr extensiven Bewirtschaftung den Vorzug geben, würde die organische Substanz erhalten werden und die CO<sub>2</sub>-Emissionen in der Atmosphäre würden um 70'000 bis 230'000 Tonnen verringert werden. Bei einem durchschnittlichen Preis von 72 Euro pro Tonne entspräche die CO<sub>2</sub>-Kompensation einem Gegenwert von 6 bis 18 Millionen Sfr pro Jahr [45].

## **Welche Massnahmen zur Torferhaltung?**

### ***Zusammenfassung der Massnahmen***

In der folgenden Tabelle (Abb. 33) werden die Ziele der Massnahmen, die Mechanismen zur Erhaltung des Torfs in entwässerten Torfböden, und deren Effizienz auf die Erhaltung des Torfs zusammengefasst.

Massnahmen	Ursprüngliches Ziel der Massnahmen	Mechanismen zur Erhaltung	Effizienz der Erhaltung
Zufuhr von Wurzelbiomasse	Bioenergieproduktion	 Verlustausgleich	Gering
Zufuhr von Biomasse (Ernterückstände)	Erhalt der landwirtschaftlichen Produktion	 Verlustausgleich	Gering
Tiefe Bodenbearbeitung (umgraben, pflügen)	Erhalt der landwirtschaftlichen Produktion	  Torfschutz	Gering
Tonbestreuung	Torferhaltung Begrenzung der Treibhausgasemissionen	 Torfstabilisierung	Von null bis hoch Experimenteller Ansatz, den es zu prüfen gilt
Sandzufuhr	Erhalt der landwirtschaftlichen Produktion	 Torfschutz  Verluste reduzieren	Von null bis gering
Auftrag von abgetragenem Boden	Erhalt der landwirtschaftlichen Produktion	 Torfschutz  Verluste reduzieren  Torfstabilisierung	Von null bis gering je nach Qualität des Bodenmaterials Der einfache « Deckeffekt » schützt den Torf wenig
Wiederherstellung eines vollständigen Bodens ohne Wiederaufbringen des Torfs auf die Oberfläche	Erhalt der landwirtschaftlichen Produktion	 1. Torfschutz	Gering
1. Torf ausserhalb des Grundwassers 2. Torf temporär im Grundwasser 3. Torf permanent im Grundwasser		 2. Temporäre Erhaltung	Mittel
		 3. Definitive Erhaltung	Hoch
Wiederherstellung eines vollständigen Bodens mit Wiederaufbringen des Torfs auf die Oberfläche	Verbesserung der landwirtschaftlichen Bewirtschaftungsverhältnisse und der Produktionskapazität  Verwertung von abgetragenem Boden und Aushubmaterial	Kein Schutz für den Torf an der Oberfläche	Beschleunigten Torfabbau. Zu vermeiden
Temporäre Wiedervernässung – Anstieg des Grundwasserstands – Reiskultur – Temporäre Flutung	Beibehalten der landwirtschaftlichen Produktion  Vereinbaren von landwirtschaftlicher Produktion und Biodiversität	 Temporäre Torferhaltung	Mittel
Permanente Wiedervernässung	Reduzierung der THG und Erhalt der Biodiversität	 Definitive Torferhaltung	Hoch

Abb. 33: Übersichtstabelle zur Effektivität der Massnahmen.

Bei einigen Massnahmen können auch klassische Massnahmen zur Erhaltung der organischen Substanz in mineralischen Böden angewendet werden.

Zum Beispiel wird empfohlen:

- ✓ die mechanische und repetitive Bodenbearbeitung zu begrenzen, da diese dazu führt, dass der Boden belüftet wird und somit die Torfmineralisierung fördert,
- ✓ den Verlust durch Winderosion zu begrenzen, den Boden nie ohne Bewuchs zu lassen und einen Windschutz anzulegen,
- ✓ organische Substanz als Dünger zuzuführen.

Insbesondere in Bezug auf die Zufuhr von abgetragenem Boden ist es unerlässlich, auf die Qualität des Bodenaushubs zu achten. Zudem müssen bei den durchgeführten Arbeiten alle notwendigen Massnahmen getroffen werden, um eine Verdichtung des Torfs und der zugeführten Materialien zu vermeiden. Das erfordert eine Planung und eine Begleitung der Arbeiten durch qualifizierte Fachleute.

### *Lückenhafte Kenntnisse*

Die Bilanz zur Torferhaltung in entwässerten Torfböden ehemaliger Flachmoore stützt sich auf wissenschaftliche Erkenntnisse und schon bereits durchgeführte Versuche. Es stehen allerdings nur sehr wenige Daten zur Verfügung, vor allem in Bezug auf die Schweizer Torfböden. Die wichtigsten Lücken sind die folgenden:

- **Die Kohlenstoffreserven in den Torfböden sind immer noch weitgehend unbekannt.** Derartige Daten aus hochauflösenden Kartierungen sind aber in zweifacher Hinsicht unbedingt notwendig: erstens, um die Nachhaltigkeit des Torfs und der Landwirtschaft einzuschätzen und zweitens, um Standorte mit umfangreichen Kohlenstoffreserven zu identifizieren, auf denen eine Änderung der Bodennutzung die Treibhausgasemissionen entscheidend reduzieren würde [45].
- **Die präzise Quantifizierung der Torfsackung ist auf wenige Standorte begrenzt.** In der Schweiz wird bei den Projektbegleitungen der verschiedenen Standorte keine identische Methodik angewendet, sodass die Variabilität des Sackungsprozesses nicht verstanden, vorgesehen oder in einem Modell etabliert werden kann. Einige Staaten in Europa haben solche Projektbegleitungen eingerichtet. So ermöglicht die Beobachtung von Versuchsstandorten in den Niederlanden seit den 1970er Jahren, zum Beispiel den Einfluss des Wasserstands auf die Torfsackung zu testen [46].
- **Die Auswirkungen der Massnahmen auf die Erhaltung der organischen Substanz** sind nicht ausreichend dokumentiert, obwohl diese Bewirtschaftungen, vor allem bei externer Materialzufuhr, eine dauerhafte und irreversible Wirkung auf die Bodenfunktion haben. Beim Tiefpflügen und Tiefrotieren, der externen Materialzufuhr oder der Wiederherstellung eines vollständigen Bodens konzentrieren sich die Studien auf den Erhalt der Produktionsfunktion. Der Torfverlust ist bei dieser rein agronomischen Beurteilung nur ein zweitrangiger Faktor. Forschungsprojekte über die Auswirkungen der Massnahmen auf die Torfsackung sind selten und gibt es erst seit kurzem. Um die Entwicklung der organischen Substanz abzuschätzen, zu quantifizieren und vorausszusehen ist die Errichtung von Versuchsstandorten mit einer präzisen Projektbegleitung erforderlich. Dies ist unbedingt erforderlich, um die Auswirkungen zu verstehen, die die verschiedenen Massnahmen nicht nur auf die landwirtschaftliche Produktion, sondern auch auf die weiteren Bodenfunktionen, wie die Klimaregulierung, haben können.
- **Die Auswirkungen der Massnahmen auf die Treibhausgasemissionen** in den landwirtschaftlich genutzten entwässerten Torfböden ehemaliger Flachmoore der Schweiz werden nur in einigen wenigen, vor kurzem erschienenen Publikationen behandelt.

Eine nur an einem einzigen Standort durchgeführte Studie dokumentiert den Einfluss einer Massnahme (Materialzufuhr) auf die Kohlenstoffbilanz und die Treibhausgasemissionen [31]. In Europa, z. B. in den Niederlanden, Norwegen und Deutschland werden seit mehreren Jahren nationale Forschungsprogramme zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen in der Gesamtheit der Torfböden, einschliesslich der entwässerten Torfböden, durchgeführt. Die Treibhausgasemissionen werden auf den Versuchsstandorten quantifiziert, bevor sie nach verschiedenen Schlüsselfaktoren, die spezifisch für jedes Land sind (Bodennutzung, Wasserstand, Intensität der Düngung, Klimabedingungen) modelliert werden. Die Ergebnisse aus diesen Versuchsprogrammen sind für Entscheidungen zur Nutzung der entwässerten Torfböden unentbehrlich.

Eine präzise Bilanz der Kohlenstoffsequestrierung entsprechend den verschiedenen Massnahmen könnte auch eine Entscheidungsgrundlage für die Monetarisierung der Kohlenstoffsequestrierung in Böden sein [47]. Diese Problematik der Monetarisierung der Klimaregulierungsfunktion durch die Böden betrifft alle Staaten in Europa. Die wissenschaftliche Community ist sich einig, dass das in den entwässerten Torfböden vorhandene Potential zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen nicht ausgeschöpft wird und von den nationalen Klimapolitiken besser umgesetzt werden könnte [48].

In der Schweiz sind diese Lücken vor allem die Folge von fehlender wissenschaftlicher Begleitung anhand von Versuchsstandorten. Die Einrichtung derartiger wissenschaftlicher Begleitungen heisst nicht, dass man mehrere Jahre auf erste Ergebnisse warten muss! Es gibt durchaus die Möglichkeit, die zeitliche Projektbegleitung durch eine Studie von repräsentativen Standorten zu ersetzen: der Vergleich zwischen analogen Standorten, die einen mit, die anderen ohne Massnahmen, würde sehr nützliche, vorläufige Daten liefern, die durch eine zeitliche Projektbegleitung konsolidiert werden könnten.

## 6. WELCHE ZUKUNFT FÜR DIE MOOREBENEN?

Angesichts des Zusammentreffens von agrarwissenschaftlichen, klimatischen und ökonomischen Problematiken bietet es sich an, sich in der aktuellen Situation Fragen über die Zukunft und die Bewirtschaftung der entwässerten Torfböden in der Schweiz zu stellen. Eine Lösung, die gleichzeitig den Bedürfnissen der Lebensmittelproduktion, der Torferhaltung und der Reduzierung der Treibhausgasemissionen gerecht werden soll, muss sowohl auf technischer als auch auf ökonomischer Ebene beurteilt werden.

### Drei Szenarien für die Zukunft der Moorebenen

Die drei Szenarien analysieren die Folgen der Massnahmen in den Bereichen Landwirtschaft, Klima, Gewässer und Biodiversität. Diese sehr unterschiedlichen Szenarien stellen Ansätze im Hinblick auf eine integrierte Nutzung der Moorebenen in der Schweiz dar. Sie sollten differenziert umgesetzt werden und an die lokalen Bedingungen und die angestrebten landwirtschaftlichen und klimatischen Ziele angepasst werden.

- Szenario 1:** Fortführung des heutigen Zustands «business as usual»
- Szenario 2:** Teilweise Torferhaltung
- Szenario 3:** Vollständige Torferhaltung

## ○ *Szenario 1: Fortführung des heutigen Zustands «business as usual»*

Die in der Schweiz gewonnenen Erfahrungen zeigen, dass ein Unterbleiben von Massnahmen zu einer weiteren Torfsackung in entwässerten Torfböden führen wird, mit erheblichen finanziellen und ökologischen Auswirkungen. Durch den Verlust an organischer Substanz werden die meisten Bereiche benachteiligt:

- › **Landwirtschaft:** Bodenverlust und Verschlechterung der Bedingungen für die Bewirtschaftung, Erhöhung der Unterhaltskosten und der für die Erhaltung der Produktionsfunktion nötigen Inputs;
- › **Klima:** Erhöhung der Treibhausgasemissionen;
- › **Gewässer:** Risiko von Überschwemmungen und von Infrastrukturschäden, sowie von Umweltbelastung (Nitrate, Pflanzenschutzmittel, Schwermetalle), wobei diese von den Inputs, aber auch von der Bodenqualität und der Nähe zum Grundwasser abhängig sind;
- › **Biodiversität:** definitiver Verlust des Lebensraums Moor und der mit ihm assoziierten Organismen.

## ● *Szenario 2: Teilweise Torferhaltung*

Die Auswertung der verschiedenen schon realisierten Massnahmen bestätigen, dass der Torf mit einer zeitweisen Wiedervernässung (durch Erhöhung des Grundwasserspiegels) teilweise erhalten werden kann; dadurch kann auch die landwirtschaftliche Produktionsfunktion, zumindest teilweise, beibehalten werden. Zu erwartende Folgen wären:

- › **Landwirtschaft:** die landwirtschaftliche Produktion müsste angepasst werden (zum Beispiel kontrollierte Veränderungen des Grundwasserspiegels, Wahl der angebauten Kulturen einschliesslich Reisanbau);
- › **Klima:** je nach gewählter Massnahme gäbe es eine mehr oder weniger bedeutende Verringerung der Treibhausgase (in Abhängigkeit von Dauer und Saisonalität des Grundwasserstands);
- › **Biodiversität:** leichte Erhöhung der Biodiversität;
- › **Wirtschaft:** wegen der Anpassung der Drainagesysteme mässig hoher Kostenaufwand für die Umsetzung.

## ● *Szenario 3: Vollständige Torferhaltung*

**Option 1:** Eine erfolgsversprechende Option für eine effiziente und nachhaltige Torferhaltung scheint die Wiederherstellung eines vollständigen Bodens ohne Wiederaufbringen des Torfs auf die Oberfläche zu sein. Sie sollte sowohl aus der Sicht der landwirtschaftlichen Produktion und der Torfentwicklung, als auch aus Sicht der Klimaregulierung getestet werden.

**Option 2:** Die radikalste und effizienteste Massnahme den Torf dauerhaft zu erhalten, ist die permanente Wiedervernässung, aber sie hat erhebliche Auswirkungen:

- › **Landwirtschaft:** drastische Verringerung der aktuell praktizierten landwirtschaftlichen Nutzung und eine Umstellung auf sehr extensive Nutzungssysteme (Weiden). In Europa sind weitere Umstellungsalternativen entwickelt worden, wie die Produktion von Schilfrohr oder von Rohrkolben, deren Fasern zur Herstellung von Isolierplatten oder zur Fertigung von Pellets für Heizungen aus Pflanzenfasern verwendet werden. Diese Alternativen könnten in der Schweiz getestet werden;
- › **Klima:** globale Treibhausgasverminderung;
- › **Gewässer:** bessere Wasserregulierung (Hochwasserminderung);
- › **Biodiversität:** Erhalt oder Wiederherstellung der natürlichen Moorlebensräume und eine Erhöhung der Biodiversität;
- › **Wirtschaft:** geringe Kosten für die Umsetzung. Die Einnahmeverluste für die Landwirtschaft und die Gewinne bei den Überschwemmungs- und Klimarisiken sollten in der finanziellen Bilanz berücksichtigt werden. Letztere müssen noch objektiv auf Grundlage der Quantifizierung der Reduktion der Treibhausgase beziffert werden.

## Sektorenübergreifender Ansatz und integrierte Bewirtschaftung

Der Verlust an organischer Substanz in den entwässerten Torfböden ist ein sektorenübergreifendes Problem, das sowohl die Landwirtschaft aufgrund der Abnahme der Produktionskapazität der Böden als auch den Umweltbereich aufgrund der Auswirkungen auf den Klimawandel und die Reduzierung der Biodiversität betrifft

Mit der Fortführung der heutigen Bewirtschaftung (Szenario «business as usual») treten durch Torfsackung auch Bedenken in Bezug auf die Nachhaltigkeit der aktuell praktizierten Landwirtschaft auf. Der kurz- oder langfristig zu erwartende Verlust der Produktionskapazität erfordert technische Lösungen und angemessene Massnahmen.

Bei der Entscheidung, ob und welche Massnahmen umgesetzt werden sollen, sind folgende Schlüsselemente zu berücksichtigen:

- **Kenntnis und Bewertung der Ausgangssituation aus Sicht der Bodenkunde** (Torfmächtigkeit, hydrologische Funktionsweise, Art des Untergrunds). Hierfür wird eine detaillierte Kartierung benötigt;
- **Die Beurteilung der landwirtschaftlichen Produktionsfunktion und deren Risiken und Erfolgchancen** ist eine unabdingbare Voraussetzung, um die Notwendigkeit einer Massnahme zu klären;
- **Wahl einer dem Ziel und der Situation angepassten Massnahme;**
- **Schätzung der Kosten und der Rentabilität einer Massnahme** (Kosten für die Renovierung und/oder Modernisierung der Drainagesysteme, Kosten für die Umsetzung der Massnahmen (z.B. niedrigere Kosten für die tiefe Bodenbearbeitung, höhere Kosten im Fall von Zufuhr von Bodenaushub);
- **Beurteilung der Auswirkungen** einer Massnahme auf die anderen Bodenfunktionen (Wasser- und Klimaregulierung, Lebensraum) sowie auf weitere Umweltbereiche (z.B. Landschaftsaspekt, archäologische Bedeutung);
- **Interessenabwägung** zwischen den verschiedenen Bodenfunktionen in Bezug auf Quantität und Eigenschaften von Torfböden.

Im Rahmen eines integrierten Managements soll die Entscheidung zwischen den verschiedenen denkbaren Szenarien sowohl aus wissenschaftlicher und technischer als auch aus finanzieller Perspektive analysiert und bewertet werden. Zur Beurteilung der Massnahmen, die in einigen Fällen den Boden dauerhaft und unumkehrbar modifizieren, müssen deren Auswirkungen auf die verschiedenen Bodenfunktionen berücksichtigt werden. Ein integriertes Management, wie es für die Wauwiler Ebene praktiziert wird, ist eine Inspirationsquelle. Eine solche landwirtschaftliche Planung – genannt Entwicklungsprozess ländlicher Raum (ELR), hat die Entstehung einer gemeinsamen Zukunftsvision für diese Ebene ermöglicht. Aus dem Projekt heraus wurden mehrere Projektbereiche formuliert, in denen die Problemfelder Drainage, ökologische Vernetzungen und Naherholung kombiniert wurden.

# Bibliografie

- [1] Schweizerischer Bundesrat (2020): Bodenstrategie Schweiz, für einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden.
- [2] «Neue Bodenstrategie: Der Bund will die Bodenverluste stoppen (2021). [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/bafu-sol>.
- [3] Hagedorn F. et al. (2018): Boden und Umwelt. Organische Bodensubstanz, Treibhausgasemissionen und physikalische Belastung von Schweizer Böden. Bern, S. 96.
- [4] BAFU (2017): Auf gutem Grund. Umwelt Nr. 4.
- [5] Wüst-Galley C., Grünig A., Leifeld J.: «Land use-driven historical soil carbon losses in Swiss peatlands», *Landsc. Ecol.*, vol. 35, no 1, p. 173-187, 2020.
- [6] BAFU (2008): Flachmoorinventar: Objektbeschreibungen. [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/bafu-bas-marais>.
- [7] Wüst-Galley C., Grünig A., Leifeld J.: Locating Organic Soils for the Swiss Greenhouse Gas Inventory Authors, no 26. 2015.
- [8] Dubler A. M. (2010): Grosses Moos. Historisches Lexikon der Schweiz (HLS). [Online]. Verfügbar unter <https://bit.ly/hls-dhs-01>.
- [9] Gattlen N.: «Die grosse Chance für das Drei-Seen-Land. Pro Natura Magazin, Nr. 2, Thema-Nr. 13.
- [10] Egli M. et al.: «Formation and decay of peat bogs in the vegetable belt of Switzerland», *Swiss J. Geosci.*, vol. 114, no 1, 2021.
- [11] Ferré M. et al.: «Sustainable management of cultivated peatlands in Switzerland», *Land use policy*, vol. 87, no December 2018, 2019.
- [12] Hollenstein L.: Rheintal. Historisches Lexikon der Schweiz (HLS). [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/hls-dhs-02>
- [13] Burgos S.: «Bodenkartierung St. Galler Rheintal». [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bfh.ch/de/forschung/forschungsprojekte/2018-504-963-622/>
- [14] Boivin, P. Guenat C. et Müller C.: «Les sols de la plaine de l'Orbe. Typologie, cartographie et problématiques associées- Pédologie -Gesorbe», 2003.
- [15] Gobat J.-M. et Guenat C.: Sols et paysages. types de sols, fonctions et usages en Europe moyenne. Lausanne, 2019.
- [16] Ziegler P.: Linth. Historisches Lexikon der Schweiz (HLS). [Online]. Verfügbar unter: <https://hls-dhs-dss.ch/fr/articles/008770/2008-01-24>.
- [17] «Landwirtschaftliches Vorprojekt Benken Plus». [Online]. [www.linthwerk.ch/index.php/benkenplus](http://www.linthwerk.ch/index.php/benkenplus).
- [18] Dubler A.-M. (2007): Gürbe. Historisches Lexikon der Schweiz (HLS). [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/hls-dhs-03>.
- [19] Caspers: «Untersuchungen zur landwirtschaftlichen Nutzung eines Niedermooses im Gürbetal/Schweiz», 2013.
- [20] BAFU: Landschaften von nationaler Bedeutung. Bundesinventar der Landschaften und Naturdenkmäler (BLN). [Online]. Verfügbar unter: <https://bit.ly/bafupaysages>.
- [21] Sägesser H., Achermann M.: « Aktuelle Praxis der Bodenverbesserung von Moosböden. Wauwiler Moos LU. », in Journées Proagricultura Seeland. 1er Mars 2019.
- [22] Herot S.: « Die Böden der Wauwiler Ebene », *Mitteilungen der Naturforschenden Gesellschaft Luzern*, vol. 36, 1999.
- [23] Verein Freunde Wauwiler Ebene: « Landwirtschaftliche Planung Plus Wauwiler Ebene », 2019.
- [24] Brunner J. et al.: Kartieren und Beurteilen von Landwirtschaftsböden. Schriftenreihe. 1997.
- [25] Oeschlin S., Nussbaum M., Tatti D., Kellermann L., Bueler F., Burgos S.: « Bodenkartierung St. Galler Rheintal », 2020.
- [26] Burgos S.: « Cartographie des sols organiques », in *Formation* 11-12 septembre 2018. Ins, 2018.
- [27] S. Pro Agricultura: « Ergebnisse BOVE ». [Online]. Verfügbar unter: <https://proagricultura.ch/projekte/laufende-projekte/ergebnisse-bove/>.
- [28] Bundesrat: Eidgenössische Volksinitiative 'zum Schutz der Moore - Rothenturm-Initiative'. Art. 24sexies Abs. 5
- [29] Leifeld, J. Müller, M., Fuhrer, J.: « Peatland subsidence and carbon loss from drained temperate fens », *Soil Use Manag.*, vol. 27, no 2, p. 170-176, 2011.
- [30] Pressler, J.: «Die Böden des Betriebes Bellechasse unter Berücksichtigung der Moorsackung», ETHZ, 1993.
- [31] Wang Y. et al.: «Soil carbon loss from drained agricultural peatland after coverage with mineral soil», *Sci. Total Environ.*, vol. 800, p. 149498, 2021.
- [32] Paul S.M. et al.: «Greenhouse gas balance of a drained organic agricultural soil with mineral soil coverage», in *Eurosoil*, 2021.
- [33] Paul S., Ammann C., Alewell C., Leifeld J.: «Carbon budget response of an agriculturally used fen to different soil moisture conditions», *Agric. For. Meteorol.*, vol. 300, no August 2020, p. 108319, 2021.
- [34] Ferré M.: «Sustainable management of cultivated organic soils in Switzerland- An economic and policy analysis», ETH Zürich, 2017.
- [35] Leifeld J.: «Distribution of nitrous oxide emissions from managed organic soils under different land uses estimated by the peat C/N ratio to improve national GHG inventories», *Sci. Total Environ.*, vol. 631-632, p. 23-26, 2018.
- [36] Leifeld J., Vogel D., Bretscher D.: «Treibhausgasemissionen entwässerter Böden», *Agroscope Sci.*, no 74, 2019.
- [37] Cader C. et al.: «Response of peat decomposition to corn straw addition in managed organic soils», *Geoderma*, vol. 309, no September 2017, p. 75-83, 2018.
- [38] Leifeld J., Alewell C., Paul S. M.: «Accumulation of C4-carbon from Miscanthus in organic-matter-rich soils », *GCB Bioenergy*, vol. 13, no 8, p. 1319-1328, 2021.
- [39] VOL: « Bodenbericht 2017 », 2017.
- [40] van Agtmaal M.: «Clay enrichment in cultivated peatlands may reduce CO2 emissions.», in *Eurosoil*, 2021.
- [41] Vogelwarte: «Nouveau restauroute pour les limicoles (25.10.2017)», 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://bit.ly/vogelwarte01>.
- [42] Gramlich A., Fabian Y., Jacot K.: « Ökologischer Nassreis-Anbau auf vernässenden Ackerflächen in der Schweiz », *Agridea*, no 3804, 2021.
- [43] Wen Y. et al.: «Raising the groundwater table in the non-growing season can reduce greenhouse gas emissions and maintain crop productivity in cultivated fen peats», *J. Clean. Prod.*, vol. 262, p. 121179, 2020.
- [44] Evans C. D. et al.: «verriding water table control on managed peatland greenhouse gas emissions», *Nature*, vol. 593, no 7860, p. 548-552, 2021.
- [45] Keller A., Franzen J., Knüsel P., Martin A. P.: Bodeninformations-Plattform Schweiz (BIP-CH). Bern, 2018.
- [46] van den Akker J.J.H., Hendriks R. F. Hoving I. E., Massop H.: « Evaluation of 50 years subsidence monitoring of a peat meadow parcel to compare several methods to determine Co2-emissions. », in *Eurosoil Geneva*, 2021.
- [47] Nationalrat (2019): Postulat Bourgeois. Kohlenstoffsequestrierung in Böden. 2019.
- [48] Regina K., Sheehy J., Myllys M.: «Mitigating greenhouse gas fluxes from cultivated organic soils with raised water table», *Mitig. Adapt. Strateg. Glob. Chang.*, vol. 20, no 8, p. 1529-1544, 2015.

# Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Alter des Torfs, ein Beispiel aus dem Seeland.
- Abb. 2: Lokalisierung der gesamten «organischen Böden» der Schweiz.
- Abb. 3: Grosses Moos im Seeland (BE, FR).
- Abb. 4: St. Galler Rheintal (SG).
- Abb. 5: Orbe-Ebene (VD).
- Abb. 6: Wauwiler Ebene (LU).
- Abb. 7: Diversität der Torfböden : zwischen entwässerten Moorebenen und innerhalb einer entwässerten Moorebene, Orbe-Ebene (oben) Seeland (unten).
- Abb. 8: Vergleich zwischen einem landwirtschaftlich genutzten entwässerten Torfboden (links) und einem landwirtschaftlich genutzten Mineralboden (rechts).
- Abb. 9: Organische Substanz in den entwässerten Torfböden: Eigenschaften, sowie ökologische und sozio-ökonomische Funktionen.
- Abb. 10: Landwirtschaftliche Produktion.
- Abb. 11: Wasserregulierung.
- Abb. 12: Klimaregulierung.
- Abb. 13: Einfluss des Wasserstands auf Treibhausgasemissionen in organischen Böden.
- Abb. 14: Einfluss des Wasserstands auf die antagonistischen Funktionen der Torfböden.
- Abb. 15: Torf in einem nicht entwässerten Flachmoor (links); Torf in einem entwässerten Torfboden (rechts).
- Abb. 16: Torfsackung (in Metern pro 100 Jahre) in Moorebenen.
- Abb. 17: Abbau der organischen Substanz von organischen Böden nach dem von Post Index.
- Abb. 18: Auftreten von ungünstigen Bodensubstraten nahe bei der Oberfläche: Kreideschicht (links), wenig durchlässige Schicht (rechts).
- Abb. 19: Über dem Boden liegender Drainage-Schacht.
- Abb. 20: Sechs Massnahmen zur Erhaltung der organischen Substanz in Torfböden.
- Abb. 21: Chinaschilf (*Miscanthus*).
- Abb. 22: Vereinfachte Darstellung vom Tiefpflügen des Bodens.
- Abb. 23: Tiefpflügen (vorher, nachher).
- Abb. 24: Vereinfachtes Schema von rotierendem Umgraben.
- Abb. 25: Vereinfachtes Schema zur Materialzufuhr.
- Abb. 26: Überschüttung mit Sand ohne Durchmischung mit dem Torf.
- Abb. 27: Vereinfachte Darstellung einer kompletten Wiederherstellung eines Bodens durch Materialzufuhr.
- Abb. 28: Vereinfachtes Schema zur Wiederherstellung eines vollständigen Bodens mit Wiederaufbringen des Torfs an die Bodenoberfläche.
- Abb. 29: Wiederherstellung eines vollständigen Bodens mit Wiederaufbringen des Torfs auf die Oberfläche.
- Abb. 30: Vereinfachte Darstellung der temporären oder permanenten Wiedervernässung.
- Abb. 31: Temporäre Flutung im Herbst zur Schaffung eines Limikolen-Rastplatzes (Orbe-Ebene).
- Abb. 32: Pilotversuch von Reisanbau im Seeland.
- Abb. 33: Übersichtstabelle zur Effektivität der Massnahmen.

## Glossar

**Abgetragener Boden (Bodenaushub):** Abgetragenes Material aus dem Oberboden (A) und dem Unterboden (B).

**Acker- und Gemüsebau:** entspricht im Schweizer System den «offenen Ackerflächen». Hierbei werden alle Kulturen nach einem Rotationsprinzip angebaut. Es handelt sich um einjährige Kulturen.

**Alternativkulturen:** Der Begriff umfasst verschiedene Alternativen zum heute praktizierten Acker – und Gemüsebau. Dabei handelt es sich entweder um andere Kulturen (zum Beispiel Grünland und verschiedene Nutzungsarten, Reisanbau) oder um andere Anbausysteme (zum Beispiel Paludikultur, Agroforstwirtschaft).

**Aushubmaterial (oder Aushub):** Materialien, die aus dem Untergrund ausgehoben werden und bei Bodenbewirtschaftungen, aber vor allem im Baubereich verwendet werden.

**Bodenfunktionen:** Gesamtheit der in der nationalen Bodenstrategie definierten Bodenfunktionen: es gibt drei ökologische Bodenfunktionen (Produktion, Regulierung, Lebensraum) und drei sozio-ökologische Funktionen (Träger, Rohstoffe, Archiv).

**Entwässerte Torfböden:** Entwässerte Torfböden sind Böden, die sich in alten, vom Menschen trockengelegten Nieder- oder Hochmooren gebildet haben.

**Flachmoor (oder Niedermoor):** Im eigentlichen Sinn handelt es sich um ein Moorbiotop, dass wegen zeitweiser Überschwemmungen oder einem hohen Grundwasserstand durch einen Wasserüberschuss und durch eine spezifische Vegetation charakterisiert ist. Im Gegensatz zum Hochmoor ist das Flachmoor mit mineralreichem Wasser verbunden.

**Hochmoor (sauer) oder Torfmoor. Hochmoor oder Torfmoor, auch Regenmoor genannt:** Moorbiotop, dessen Oberfläche ausschliesslich durch atmosphärischen Niederschlag versorgt wird und das durch eine normalerweise mächtige Torfschicht gekennzeichnet ist. Dieses extreme Milieu wird von Torfmoosen (Sphagnacae) dominiert und weil es vom mineralischen Untergrund isoliert ist, ist es sehr arm an Nährstoffen und Sauerstoff und sehr sauer.

**Humus:** Stabiler Bestandteil der organischen Bodensubstanz (Verweildauer in der Grössenordnung von hunderten bis tausenden von Jahren). Die anderen Bestandteile (lebende und leicht abbaubare organische Substanz) haben eine Verweildauer von einigen Jahren bis einigen Jahrzehnten). Humus entsteht aus der Umwandlung der organischen Substanz unter aeroben Bedingungen (bei Vorhandensein von Sauerstoff).

**Massnahme:** Der Begriff bezieht sich in diesem Dokument auf eine einzelne Massnahme oder eine Reihe von Massnahmen, die bewusst angewandt werden, um zwei Funktionen von entwässerten Torfböden zu erhalten oder zu entwickeln (Produktionsfunktion, Klimaregulierungsfunktion). Er umfasst die Drainage, die Zufuhr von Biomasse, die tiefe Bodenbearbeitung, die Zufuhr von mineralischem Material und die temporäre oder permanente Wiedervernässung.

**Mineralisierung (Bodenschwund):** Umwandlung der organischen Boden- oder Torf- Substanz. Die Mineralisierung produziert mineralisches Material ausgehend von organischer Substanz und braucht für diesen Vorgang Sauerstoff. Bei intensiver Mineralisierung werden Elemente ( $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ) in die Bodenlösung oder ins Grundwasser und Gase ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_x\text{O}_y$ ) in die Atmosphäre freigesetzt. Nur ein kleiner Anteil der löslichen Elemente verbleibt im Boden und verändert die chemische Zusammensetzung des Torfs.

**Mineralisches Material:** Vorwiegend aus mineralischem Material zusammengesetztes Material, im Gegensatz zur organischen Substanz. Dieser Begriff schliesst Material aus den abgetragenen Böden (Bodenaushub) und aus dem ausgehobenen Untergrund (Aushubmaterial) ein.

**Miscanthus giganteus (Elefantengras, Chinaschilf):** Zur Verwendung als Bioenergie kultivierte Staudenpflanze. Dank seinem geringen Bedarf an Nährstoffen, seinem schnellen Wachstum und seinem hohen Ertrag produziert das Miscanthus eine beachtliche Biomasse.

**Organische (Boden) Substanz:** Gesamtheit der toten oder lebenden im Boden befindlichen organischen Substanzen pflanzlichen, tierischen oder mikrobiellen Ursprungs, die im Boden in mehr oder weniger umgewandelter Form vorhanden sind. Der stabile Bestandteil dieser organischen Substanzen bildet den Humus. Die organische Substanz besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff (durchschnittlich über 55%), aber auch aus Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff, Schwefel und Phosphor, sowie Kalzium, Magnesium, Natrium und Chlorid. Der Gehalt an organischer Substanz wird gemessen oder geschätzt, indem der Gehalt an organischem Kohlenstoff mit einem Faktor multipliziert wird (1,7 bis 2).

**Paludikultur:** Produktion von Biomasse in wassergesättigten Böden. Bei Flachmooren umfasst die Paludikultur den Anbau verschiedener Pflanzenarten, wie Schilf (*Phragmites australis*), Segge (*Carex spec.*) und Rohrkolben (*Typha spec.*), die für die Energieproduktion und beim Bau verwendet werden können, sowie die Erle (*Alnus glutinosa*) für die Produktion von hochwertigem Holz oder die Weide (*Salix spec.*) für den Niederwald mit Kurzumtrieb, sowie Arzneipflanzen.

**Sackung (Torfsackung):** Absackung, die zu einem Absenken des Bodenniveaus führt. Bei entwässerten organischen Böden ist die Torfsackung Ergebnis des Zusammenwirkens von Setzung, Schrumpfung und Mineralisierung des Torfs, sowie vom Verlust von Elementen, die in das Grundwasser freigesetzt werden.

**Torf:** Ein aus Wasser (88 bis 97%), aus Trockensubstanz (2 bis 10%) in hauptsächlich organischer Form und aus Gas (1 bis 7%) zusammengesetztes Material. Torf entsteht durch Anhäufung und unvollständige Zersetzung von mehr oder weniger zersetzten Pflanzenresten unter Vorhandensein von Wasser und unter Abwesenheit von Sauerstoff.

**Torfböden:** Hauptsächlich aus Torf bestehende Böden mit einer mindestens 50 cm mächtigen Torfschicht (der genaue Wert variiert je nach Klassifizierung).

# **Aus Flachmooren entstandene entwässerte Torfböden**

Landwirtschaftliche Nutzung und Torferhalt

***Bericht 2022***