

Sachdokumentation:

Signatur: DS 4314

Permalink: www.sachdokumentation.ch/bestand/ds/4314



Nutzungsbestimmungen

Dieses elektronische Dokument wird vom Schweizerischen Sozialarchiv zur Verfügung gestellt. Es kann in der angebotenen Form für den Eigengebrauch reproduziert und genutzt werden (private Verwendung, inkl. Lehre und Forschung). Für das Einhalten der urheberrechtlichen Bestimmungen ist der/die Nutzer/in verantwortlich. Jede Verwendung muss mit einem Quellennachweis versehen sein.

Zitierweise für graue Literatur

Elektronische Broschüren und Flugschriften (DS) aus den Dossiers der Sachdokumentation des Sozialarchivs werden gemäss den üblichen Zitierrichtlinien für wissenschaftliche Literatur wenn möglich einzeln zitiert. Es ist jedoch sinnvoll, die verwendeten thematischen Dossiers ebenfalls zu zitieren. Anzugeben sind demnach die Signatur des einzelnen Dokuments sowie das zugehörige Dossier.



Bern, 29. März 2023

Kohlenstoffsequestrierung in Böden

Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulats 19.3639 Bourgeois vom 18. Juni 2019

1 Ausgangslage

1.1 Auftrag

Mit dem Postulat 19.3639 wurde der Bundesrat ersucht, einen Bericht zur Kohlenstoffsequestrierung in den verschiedenen Böden der Schweiz zu erstellen und dabei folgende Punkte zu integrieren:

1. Eine ausführliche Analyse des Potenzials der Schweizer Böden, langfristig Kohlenstoff zu binden und zu speichern;
2. die infrage kommenden Massnahmen zur langfristigen Verbesserung der Kohlenstoffbilanz durch die verschiedenen Böden unseres Landes, aber auch die Kosten, Risiken und Chancen im Zusammenhang mit diesen Massnahmen sowie die Herausforderungen, die deren Handhabung betreffen;
3. die vorstellbaren Anreize und Programme, die die Grundeigentümerinnen und Grundeigentümer sowie die Bäuerinnen und Bauern dazu bewegen würden, Massnahmen zu ergreifen, um Kohlenstoff abhängig vom Bodenpotenzial zu binden und so die Bodenqualität zu verbessern;
4. die Möglichkeiten und Grenzen, die Kohlenstoffsequestrierung in Böden zu quantifizieren und zu bewerten, sowie eine Analyse der verschiedenen Optionen wie zum Beispiel die Ausstellung von CO₂-Zertifikaten.

Der Bundesrat anerkannte in seiner Stellungnahme die Notwendigkeit einer solchen Analyse, insbesondere angesichts der Rolle, die die Böden für die Erreichung der international vereinbarten Klimaziele spielen können und beantragte am 4. September 2019 die Annahme des Postulats. Der Nationalrat hat daraufhin das Postulat am 27. September 2019 zur Beantwortung überwiesen.

Für die Erstellung des Berichts über die Kohlenstoffsequestrierung in Böden beauftragte das BAFU Fachpersonen damit, die in der Schweiz vorhandenen Daten und Erfahrungen zusammenzutragen und technische Fachberichte zu verfassen. Die Kapitel 3 und 4 des vorliegenden Berichts stützen sich inhaltlich auf die drei Fachberichte, die sich mit den vier Fragen des Postulats 19.3639 befassen.^{1,2,3}

1.2 Hintergrund

Der anthropogene Klimawandel und seine Auswirkungen sind ein länderübergreifendes Problem. Mit der Ratifizierung des Klimaübereinkommens von Paris⁴ im Jahr 2015 hat sich die Schweiz verpflichtet, sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene Massnahmen zur Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) zu ergreifen und bis 2050 die Klimaneutralität zu erreichen. Am 27. Januar 2021 hat der Bundesrat die langfristige Klimastrategie der Schweiz⁵ verabschiedet. Diese präsentiert die Leitlinien für die Klimapolitik bis 2050 und legt strategische Ziele für die verschiedenen Sektoren fest. In erster Linie müssen die THG-Emissionen gesenkt werden. Da jedoch nicht alle Emissionen vollständig vermieden werden können, müssen auch komplementäre Technologien zum Einsatz kom-

¹ Keel, S.G., Johannes, A., Boivin, P., Burgos, S., Charles, R., Hagedorn, F., Kulli, B., Leifeld, J., Saluz, A., Zimmermann, S. (2021) Soil carbon sequestration in Switzerland: analysis of potentials and measures (Postulate Bourgeois 19.3639). Report by Agroscope. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Berne.

² Baranzini A., Maradan D., Blockley J. (2021), Aspects économiques de la séquestration du carbone dans les sols (Postulat Bourgeois 19.3639), Report by HEG. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Berne.

³ Fließbach A., Tresch S., Steffens M. (2021) Review on the techniques and requirements for monitoring stock changes of soil organic carbon (Postulate Bourgeois 19.3639). Report by FiBL. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Berne.

⁴ SR 0.814.012

⁵ Bericht «Langfristige Klimastrategie der Schweiz» vom 27. Januar 2021 (<https://www.news.admin.ch/news/message/attachments/65874.pdf>).

men.⁶ Dazu gehören die sogenannten Negativemissionstechnologien (NET). Sie ermöglichen es, mit biologischen oder technischen Verfahren der Atmosphäre CO₂ zu entziehen und dauerhaft zu speichern. Auch wenn die Speicherung von CO₂ in die organische Bodensubstanz (OBS) über die Fotosynthese ein natürlicher Prozess ist, gilt die Sequestrierung von Kohlenstoff in Form von Ernterückständen oder Pflanzenkohle als NET (Abb. 1).

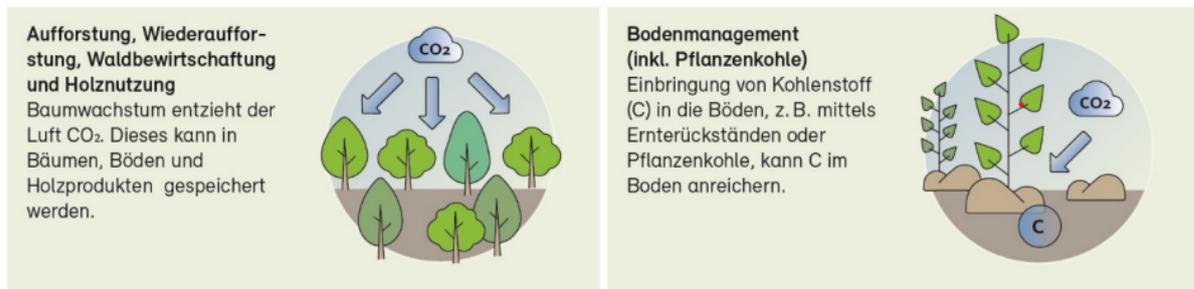


Abbildung 1: Zwei Ansätze zur biologischen Sequestrierung, mit denen negative Emissionen erzeugt werden können. Quelle: Bericht «Langfristige Klimastrategie der Schweiz» (BAFU-Darstellung gestützt auf Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change [MCC]).⁷

Die Strategie Biodiversität Schweiz wurde vom Bundesrat am 25. April 2012 verabschiedet. Am 6. September 2017 wurde der Aktionsplan genehmigt, mit welchem die Ziele der Strategie Biodiversität konkretisiert und mittels Massnahmen umgesetzt werden sollen⁸. Als eine Synergiemassnahme, um Grundlagen zu verbessern und langfristig Raum für die Erhaltung der Biodiversität in Qualität und Quantität zu verankern, wurde die Entwicklung einer Bodenstrategie Schweiz aufgenommen.

Die im Jahr 2020 vom Bundesrat verabschiedete Bodenstrategie Schweiz⁹ legt den Fokus auf die Bodenfunktionen (drei ökologische Funktionen: Produktion, Regulierung und Lebensraum; drei sozioökonomische Funktionen: Träger, Rohstoffe und Archiv) und auf einen multifunktionalen Ansatz, der auf einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden abzielt. In der Strategie wird der Verlust von OBS als gravierendes Problem identifiziert, da diese entscheidend ist für die ökologischen Bodenfunktionen. Dank ihr wird die Biodiversität der Bodenorganismen erhalten, die hauptsächlich für die Bodenfunktionen verantwortlich sind. Für diesen Themenbereich wurden zwei Ziele mit strategischen Stossrichtungen formuliert: Kompensation des Verlusts von OBS infolge landwirtschaftlicher Nutzung mineralischer Böden (ZL4) und Minimierung des Verlusts von OBS infolge landwirtschaftlicher Nutzung organischer Böden (ZL5).

Die Bodenstrategie Schweiz hebt ebenfalls die wichtige Rolle des Bodens für das Klima hervor: Die Bekämpfung des Klimawandels und die Abmilderung seiner Auswirkungen erfordern sowohl Massnahmen zur Bewahrung und Erhöhung des Kohlenstoffvorrats im Boden als auch solche zur Reduktion der THG-Emissionen aus dem Boden. Beides kann mittels angepasster Bodennutzung und Bewirtschaftung, insbesondere von landwirtschaftlich genutzten Böden, erfolgen.

2 Organische Bodensubstanz

2.1 Was ist organische Bodensubstanz?

Böden enthalten organischen Kohlenstoff in unterschiedlicher Form. Mit dem Begriff «organische Bodensubstanz» (OBS) werden die verschiedenen organischen Bestandteile des Bodens in unterschiedlichen Zersetzungsstadien sowie die Bodenorganismen bezeichnet. Zwischen 55 und 60 Prozent der OBS bestehen aus organischem Bodenkohlenstoff (engl.: Soil Organic Carbon SOC). Der Rest der OBS setzt sich hauptsächlich aus Sauerstoff, Wasserstoff und Stickstoff zusammen. Im Boden ist die OBS:

⁶ [CO₂-Entnahme und -Speicherung \(admin.ch\)](#)

⁷ [Klimawandel: Bundesrat verabschiedet Bericht zu negativen CO₂-Emissionen \(admin.ch\)](#).

⁸ [Strategie Biodiversität Schweiz und Aktionsplan \(admin.ch\)](#)

⁹ Bodenstrategie Schweiz für einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden, Schweizerischer Bundesrat, 2020.

(i) an die Oberfläche verschiedener Bodenmineralien gebunden, (ii) in grössere oder kleinere Bodenaggregate eingebunden oder (iii) als Streu an der Bodenoberfläche oder in den Bodenporen leicht verfügbar. In mineralischen Böden (z. B. Waldböden oder landwirtschaftlich genutzten Böden) machen die OBS-Gehalte meist nur wenige Prozent des Gesamtmaterials aus, während in organischen Böden (Torfböden) der überwiegende Teil des Bodenvolumens aus OBS bestehen kann.

Organische Bodensubstanz: ein wesentlicher Bestandteil des Bodens

Die OBS ist für die Funktionsweise der Böden von zentraler Bedeutung. Sie beeinflusst die meisten Prozesse, die zur Bodenfruchtbarkeit beitragen, sowie alle ökologischen Funktionen des Bodens, die in der Bodenstrategie Schweiz⁹ definiert sind (Produktion, Regulierung, Lebensraum). Zur Regulierungsfunktion gehört auch die Rolle, die die Böden bei der Klimaregulierung als THG-Quellen und -Senken spielen (Abb. 2).

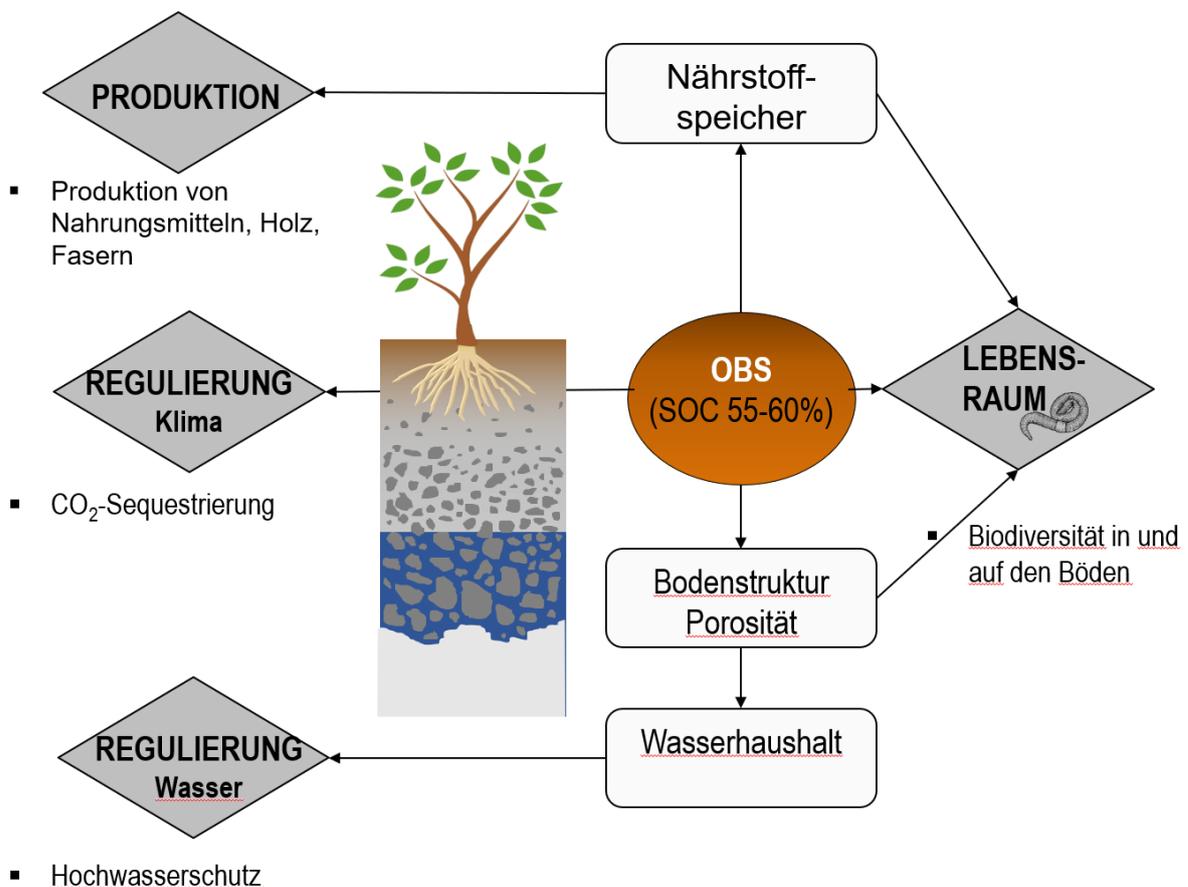


Abbildung 2: Rollen der OBS. Die OBS (orange) trägt direkt oder indirekt zu allen ökologischen Bodenfunktionen (dunkelgrau) bei und bestimmt die Bodeneigenschaften (hellgrau).

2.2 Dynamik und Kreislauf der organischen Bodensubstanz

Die natürliche Obergrenze des OBS-Vorrats wird in erster Linie durch natürliche Faktoren wie die Netto-primärproduktivität (NPP)¹⁰ bestimmt, also grösstenteils durch die klimatischen Bedingungen. Pflanzliche und in geringerem Masse auch tierische Biomasse gelangt als abgestorbene organische Substanz in den Boden und wird von der Bodenfauna umgewandelt und in die verschiedenen Schichten eingebet-

¹⁰ Die NPP beschreibt die Menge an CO₂, die von der Vegetation durch Fotosynthese aufgenommen wird, abzüglich der Menge an CO₂, die von den Pflanzen während der Atmung freigesetzt wird. Sie ist eine Schlüsselgrösse zur Beurteilung des Zustands und der Veränderung von Ökosystemen. Ausserdem kann die NPP unter anderem einen spürbaren Einfluss auf den SOC-Vorrat haben (Ablagerung von Kohlenstoff aus der lebenden Biomasse in den stabilen Humus).

tet. Weitere natürliche Faktoren, die den OBS-Vorrat steuern, sind die Qualität und Quantität der produzierten Biomasse, die Mineralogie des Bodens (insbesondere das Vorhandensein von Tonmineralien), der pH-Wert sowie die Temperatur und Feuchtigkeit des Bodens (Klimafaktoren). Die meisten der entscheidenden Faktoren stehen in Wechselwirkung zueinander und können nicht isoliert betrachtet werden.

Neben den natürlichen Faktoren beeinflussen auch anthropogene Faktoren den OBS-Vorrat. Dazu gehören Änderungen der Bodennutzung (z. B. Umwandlung von Mooren oder Wäldern in Anbauflächen) oder die Landbewirtschaftung (z. B. land- oder waldwirtschaftliche Praktiken). Landwirtschaftlich genutzte Böden und zahlreiche Wälder werden bewirtschaftet, um Biomasse (Nahrungsmittel, Fasern, Holz) zu produzieren, die später von ihrem Produktionsstandort verlagert und an anderer Stelle verwendet wird, was folglich die für die Böden verfügbare Menge an OBS verringert.

2.3 Verluste an organischem Bodenkohlenstoff in der Vergangenheit

Ausmass und räumliche Verteilung der OBS-Verluste aufgrund von Änderungen der Bodennutzung lassen sich nur schwer abschätzen. Eine Meta-Analyse der derzeit verfügbaren Literatur zeigt, dass **landwirtschaftlich genutzte Böden**, die seit den Anfängen der Landwirtschaft in der Jungsteinzeit¹¹ mehr oder weniger intensiv genutzt wurden, seit Beginn ihrer Bewirtschaftung weltweit **zwischen 36 und 78 Prozent des Kohlenstoffs in den ersten 30 Zentimetern und zwischen 25 und 61 Prozent im ersten Meter verloren haben dürften**.¹² In Abbildung 3 wurden die Veränderungen des SOC auf globaler Ebene für eine Gesamttiefe von zwei Metern dargestellt. Die gemässigte Zone Europas gehört zu den Gebieten mit den grössten SOC-Verlusten.

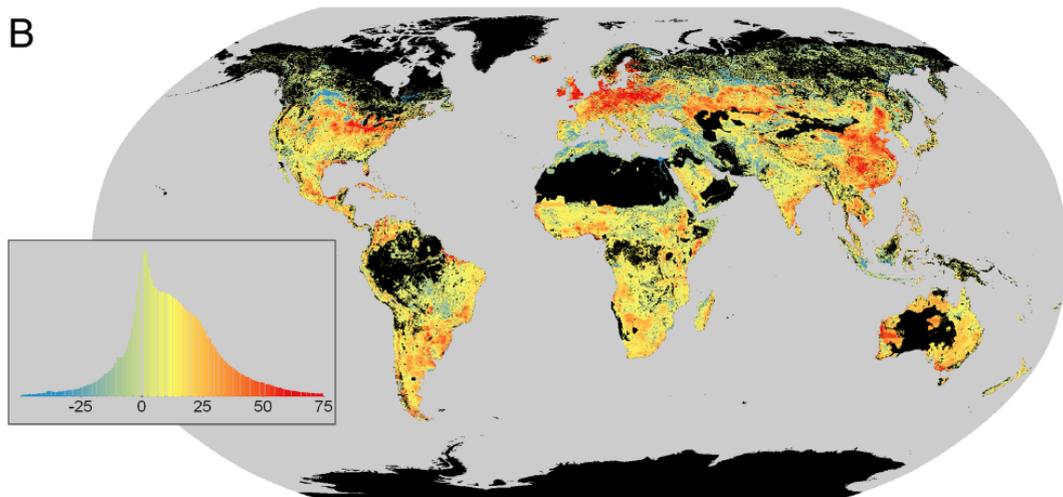


Abbildung 3: Modell der Veränderung des SOC in den ersten zwei Metern: Die Legende wird als Histogramm des SOC-Verlusts (Mg C ha^{-1}) dargestellt, wobei positive Werte den Verlust und negative Werte den Nettogewinn an SOC anzeigen.

Einer der Hauptgründe für den relativ geringen OBS-Vorrat in Ackerböden ist die Abführung von organischer Substanz durch die Ernte, die nur teilweise durch den Eintrag organischer Dünger oder von Pflanzenrückständen kompensiert wird. In der Schweiz sind die niedrigsten Werte bei den Ackerbaustandorten festzustellen. Seit Beginn der Messungen der Nationalen Bodenbeobachtung (NABO)¹³ im

¹¹ Die Dauer der Jungsteinzeit variiert je nach Region. In der Schweiz umspannte diese Periode etwa die Jahre 6500 bis 2200 vor unserer Zeitrechnung.

¹² Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G. J. (2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(36).

¹³ [Nationale Bodenbeobachtung \(NABO\) \(admin.ch\)](http://www.admin.ch/nabo)

Jahr 1984 hat sich der SOC-Gehalt in Ackerböden nur geringfügig verändert:¹⁴ Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass die SOC-Verluste vor Messbeginn erfolgten (siehe Abb. 3). Ein Langzeitversuch (Zurich Organic Fertilisation Experiment ZOFE¹⁵) hat gezeigt, dass der OBS-Verlust über 60 Jahre zwischen 15 und 40 Prozent ($0,1-0,25 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) beträgt.

Laut einer aktuellen Studie gingen in der Schweiz 15 bis 55 Megatonnen Kohlenstoff durch die Entwässerung von organischen Böden verloren (drainierte Torf- und Moorböden).¹⁶ Obwohl die Fläche organischer Böden abgenommen hat, sind die jährlichen Kohlenstoffemissionen vor allem seit Mitte des 20. Jahrhunderts aufgrund der intensiveren Nutzung, insbesondere für die Landwirtschaft, erheblich angestiegen. Die verbleibenden Kohlenstoffvorräte in den Schweizer Böden entsprechen in etwa denjenigen, die in den letzten 300 Jahren verloren gegangen sind.

2.4 Modellierung der Sequestrierung von CO₂-Emissionen in Abhängigkeit der Klimaentwicklung

In einer von Agroscope für die FAO durchgeführten Modellierung wurde das Potenzial der SOC-Sequestrierung in der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Ackerkrume (0–30 cm) für die nächsten 20 Jahre geschätzt.¹⁷ Dazu wurden drei verschiedene Klimaszenarien und ein erhöhter Biomasseeintrag im Vergleich zu einem Business-as-usual-Szenario berechnet. Es wurde festgestellt, dass die SOC-Vorräte im Status-quo-Szenario bis 2040 im Durchschnitt abnehmen werden und dass diese Verluste nur durch einen erhöhten Eintrag von organischer Substanz und eine angepasste Bewirtschaftung kompensiert werden können.

3 Sequestrierung von organischem Kohlenstoff in Böden

3.1 Konzept der Sequestrierung von organischem Kohlenstoff in Böden

Der Begriff «**SOC-Sequestrierung**» (auch als CO₂-Sequestrierung bezeichnet) ist eng mit der Funktion des Bodens als Kohlenstoffsенke und als Puffer im globalen CO₂-Kreislauf verknüpft. Die Kohlenstoffsequestrierung im Boden wird definiert als «*Prozess des Eintrags von CO₂ aus der Atmosphäre in den Boden auf einer bestimmten Fläche durch Pflanzen, Vegetationsrückstände und anderweitige organische Materie, die sich auf der betrachteten Fläche als Teil der organischen Bodensubstanz im oder auf dem Boden befinden*»¹⁸. Dieser Begriff ist nicht mit der «**SOC-Speicherung**» zu verwechseln, die sich lediglich auf die Menge an gespeichertem SOC bezieht, aber nicht zwangsläufig eine Netto-Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre über der entsprechenden Fläche beinhaltet. So gilt beispielsweise die Erhöhung des SOC-Vorrats durch die Anwendung von organischem Dünger an sich noch nicht als Kohlenstoffsequestrierung. Wenn organischer Dünger aus importierten Nahrungsmitteln hergestellt wurde, fand das Entziehen des CO₂ aus der Atmosphäre zudem im Herkunftsland der Nahrungsmittel und nicht in der Schweiz statt.

¹⁴ [Indikator Boden \(admin.ch\)](#)

¹⁵ Oberholzer, H. R., Leifeld, J., & Mayer, J. (2014). Changes in soil carbon and crop yield over 60 years in the Zurich Organic Fertilization Experiment, following land-use change from grassland to cropland. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(5), 696-704.

¹⁶ Wüst-Galley, C., Grünig, A., & Leifeld, J. (2020). Land use-driven historical soil carbon losses in Swiss peatlands. *Landscape Ecology*, 35(1), 173-187.

¹⁷ FAO. 2019. Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Rome, FAO. 170 pp. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.

¹⁸ Olson, K. R., Al-Kaisi, M. M., Lal, R., & Lowery, B. (2014). Experimental consideration, treatments, and methods in determining soil organic carbon sequestration rates. *Soil Science Society of America Journal*, 78(2), 348-360 (cité dans le rapport technique 1).

Die Gesamtmenge an SOC im Boden wird als SOC-Vorrat bezeichnet und bezieht sich jeweils auf die Menge an SOC, die pro Flächeneinheit über die gesamte Tiefe des Bodens gespeichert ist. Dieser Vorrat wird als Produkt aus dem SOC-Gehalt, der Lagerungsdichte des Bodens und dem Volumen des verfügbaren Bodens (ohne das Volumen der Steine) berechnet. **Üblicherweise wird der Vorrat in Bezug auf die Oberfläche angegeben, doch Informationen über die entsprechende spezifische Bodentiefe sind für die Bewertung und den Vergleich von SOC-Vorräten von entscheidender Bedeutung.**

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass sich die SOC-Vorräte unter konstanten Landnutzungs-, Bodenbewirtschaftungs- und Klimabedingungen im Gleichgewicht befinden. Allerdings kommt es aufgrund der je nach Jahreszeit unterschiedlichen Klimaeinflüsse oder der Fruchtfolge und des Anbaumanagements auf landwirtschaftlich genutzten Böden zu monatlichen bis jährlichen Schwankungen, ohne dass der Durchschnittswert eine langfristige Veränderung aufweist. Wenn der Eintrag von SOC über einen längeren Zeitraum hinweg gleich hoch ist wie der Austrag, fungieren die Böden sowohl als CO₂-Senken als auch als CO₂-Quellen.

Das **Sequestrierungspotenzial** ist die Differenz zwischen dem tatsächlichen SOC-Vorrat und der maximalen SOC-Speicherkapazität, die durch eine Netto-Entfernung von CO₂ aus der Atmosphäre¹⁹ in einem bestimmten Klima und über einen gegebenen Zeitraum erreicht werden kann (siehe Kap. 3.1, erster Abschnitt). **Dieses Potenzial ist immer standortspezifisch und abhängig von vergangenen und gegenwärtigen Bodenbewirtschaftungsmassnahmen** (Abb. 4). Die maximalen Eintragsraten werden durch die maximale NPP eines Standorts und den Umgang mit der erzeugten Biomasse begrenzt (d. h. wie viel und in welcher Form Biomasse abgetragen wird oder am Standort verbleibt). Die Fruchtfolgeraten der OBS variieren nicht nur zwischen unterschiedlich gebundenen organischen Rückständen, sondern auch in Abhängigkeit von der Bodentiefe und der biotischen und abiotischen Bodenbedingungen, wie unter anderem Sauerstoffverfügbarkeit, pH-Wert und Mineralogie des Bodens. Daher ist es **nicht möglich, den Böden ein allgemeines Sequestrierungspotenzial zuzuschreiben**. Höchstens die Zunahme (oder Abnahme) des SOC-Vorrats durch spezifische Massnahmen lässt sich mit einer entsprechenden Unsicherheit abschätzen. Das Konzept der Kohlenstoffsequestrierung im Boden ist in Abbildung 4 dargestellt.

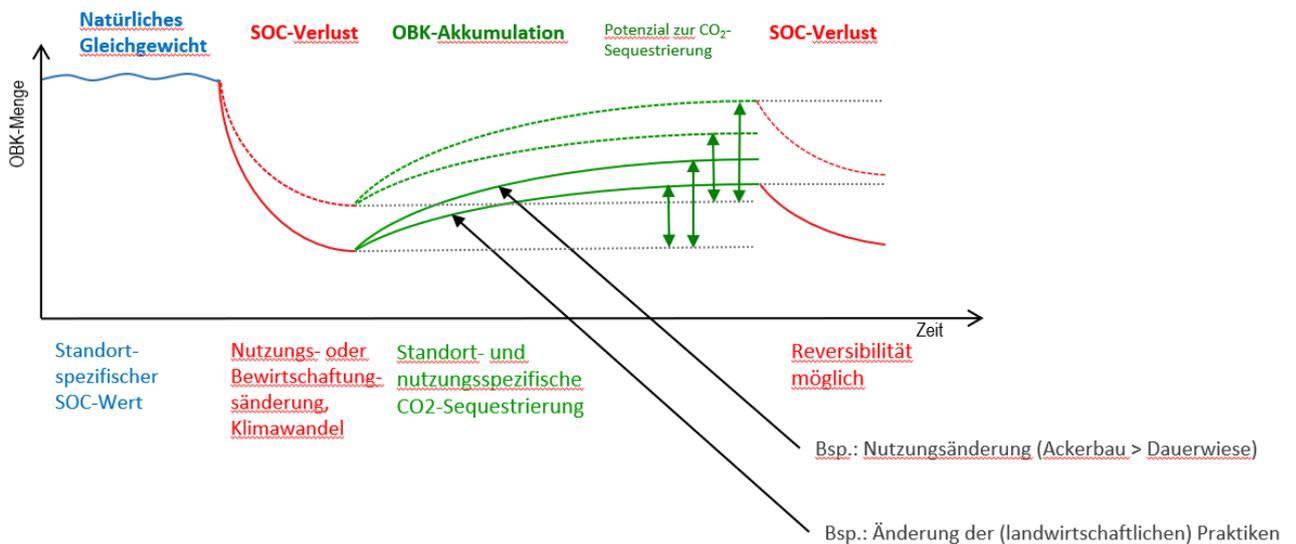


Abbildung 4: Konzept der Kohlenstoffsequestrierung in Böden. Der natürliche SOC-Vorrat ergibt sich aus einem dynamischen Gleichgewicht zwischen Kohlenstoffeintrag und -austrag und ist standortspezifisch (blaue Linie). Natürliche Böden, die nicht durch die anthropogene Nutzung beeinträchtigt werden, befinden sich normalerweise in einem solchen Gleichgewicht. Verluste von SOC-Vorräten können zum Beispiel als Reaktion auf eine veränderte Landnutzung oder den Klimawandel auftreten (rote Linien). Die Menge an SOC, die sequestriert werden kann, hängt vom aktuellen SOC-Vorrat (Ende der roten Linien) und den Bodenbewirtschaftungsmassnahmen (grüne Linien) ab. Die Zunahme des SOC-Vorrats erreicht in der Regel nach etwa 20 Jahren ein neues Gleichgewicht; **SOC-Verluste**

¹⁹ Das CO₂ wird der Atmosphäre mittels Photosynthese entzogen und **langfristig** in der stabilen OBS gespeichert.

verlaufen viel schneller als eine SOC-Akkumulation²⁰. Die Differenz im SOC-Vorrat für eine bestimmte Zeit ist das Sequestrierungspotenzial.

Böden: CO₂-Senken und -Quellen

Wenn der Eintrag an organischer Substanz (z. B. in Form von organischem Dünger oder Ernterückständen) die Verluste durch die Mineralisierung des Humus übersteigt, fungiert der Boden als CO₂-Senke. Umgekehrt wird der Boden, wenn die Verluste grösser sind als die Einträge, zu einer CO₂-Quelle. CO₂ ist zwar das wichtigste anthropogene THG, das aus dem Boden freigesetzt wird, es ist aber nicht das einzige. Der Boden kann über mikrobiologische Aktivität auch zwei weitere THG emittieren: Methan (CH₄) und Distickstoffmonoxid (Lachgas; N₂O).²¹

Die SOC-Vorräte unterscheiden sich je nach Bodentyp und Art der Landnutzung. Im Allgemeinen sind diese Vorräte in organischen Böden (natürlichen Torfmooren) am höchsten und nehmen in der Reihenfolge gemäss Abbildung 5 ab.

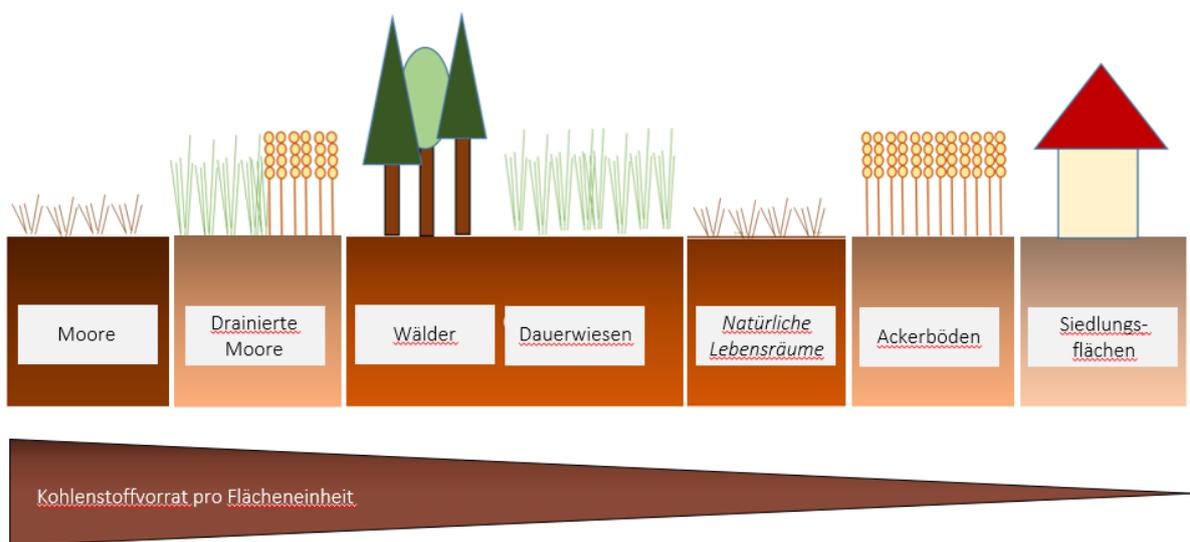


Abbildung 5: Relative SOC-Vorräte pro Flächeneinheit: Natürliche organische Böden zeichnen sich durch hohe SOC-Vorräte aus, die bei Entwässerung abnehmen; die Umwandlung von Wäldern und Dauerwiesen in Acker- und Siedlungsflächen führt zu einem SOC-Verlust (angepasst übernommen aus Amelung et al.²²).

3.2 Aktueller Stand des Wissens über das Potenzial zur Kohlenstoffsequestrierung in Schweizer Böden und mögliche Massnahmen zur Erhaltung oder Erhöhung des SOC-Gehalts

Die Schlüsselemente der derzeitigen Kenntnisse über die verschiedenen Arten der Bodennutzung (Fläche, aktueller SOC-Gehalt, Sequestrierungspotenzial und entsprechende Massnahmen) sind in den Tabellen 2 und 3 in den Kapiteln 3.3 und 3.4 zusammengefasst.

²⁰ Der Verlust sowie die Akkumulation von OBS im Boden hängen sehr stark von den standortspezifischen Bedingungen ab: Bodeneigenschaften (z. B. Tongehalt), klimatische Faktoren, forst- oder landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraktiken. Auch wenn die Erfahrung zeigt, dass Verluste sehr schnell eintreten können und die Zunahme von stabilem SOC deutlich langsamer erfolgt, ist es aufgrund der Variabilität der standortspezifischen Bedingungen nicht möglich, genaue Zahlen anzuführen.

²¹ CO₂ ist das mit Abstand bedeutendste THG, das durch den Landnutzungssektor entsteht. Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) aus Bränden, Humusverlust, Stauseen und drainierten Moorböden tragen zu einem kleinen Teil zu den Emissionen bei ([Treibhausgasbilanz der Landnutzung \(Böden, Vegetation\) \(admin.ch\)](#)). Die Flächen, die in der Schweiz für den Reisanbau genutzt werden, bei welchem Methanemissionen entstehen, sind vernachlässigbar.

²² Amelung, W., Bossio, D., de Vries, W., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Amundson, R. & Chabbi, A. (2020). Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature communications*, 11(1), 1–10.

3.2.1 Organische Böden

Häufige Vernässung verringert die Durchlüftung im Boden, was zu einer Ansammlung von teilweise zersetzten Vegetationsrückständen und zur Torfbildung führt. Böden, die sich auf diese Weise entwickelt haben (im Allgemeinen Moor- und Torfböden), werden als organische Böden bezeichnet und haben im Laufe der Jahrtausende kontinuierlich OBS akkumuliert, wodurch Torfmächtigkeiten von bis zu mehreren Metern entstanden sind. Moor- und Torfböden stellen zahlreiche Ökosystemfunktionen und -leistungen bereit.

Natürliche Torfmoore (Hoch- und Flachmoore) beherbergen eine einzigartige Artenvielfalt, spielen eine wichtige Rolle als Kohlenstoffsinken und regulieren die biogeochemischen Stoffkreisläufe. Es ist bekannt, dass sich in intakten Torfmooren in nordischen Breiten kontinuierlich SOC im Umfang von durchschnittlich 0,2 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare und Jahr anreichert. Die Sequestrierung hängt stark vom Natürlichkeitsgrad dieser Lebensräume ab.

Landwirtschaftlich genutzte organische Böden (drainierte Flachmoore) ermöglichen eine Nahrungsmittelproduktion (z. B. Gemüseanbau im Seeland oder in der Orbe-Ebene). Ihre Entwässerung führt jedoch unweigerlich zu einer Mineralisierung der OBS und hat zur Folge, dass diese Böden etwa 3 bis 10 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare und Jahr verlieren. Die Mineralisierung trägt stark zu den THG-Emissionen bei, führt zu einer Verringerung der Bodentiefe und bedroht mittelfristig sowohl die natürlichen Funktionen (Klima- und Wasserregulierung sowie Biodiversität) als auch die Produktionsfunktionen (Nahrungsmittelproduktion und Einkommen der Bewirtschafterinnen und Bewirtschafter) der Böden.

Flächen mit organischen Böden und darin gespeicherte SOC-Vorräte

Im 18. Jahrhundert waren schätzungsweise 100 000 bis 150 000 Hektaren der Landesfläche der Schweiz mit Torfmooren bedeckt. Seither ist diese Fläche auf heute etwa 30 000 Hektaren geschrumpft, wovon rund 17 000 landwirtschaftlich genutzt werden. Groben Schätzungen zufolge belaufen sich die SOC-Vorräte in organischen Böden auf 1000 bis 1500 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare, was etwa 25-mal so viel ist wie die pro Hektare gespeicherte Menge an SOC in mineralischen Ackerböden. Der gesamte SOC-Vorrat in organischen Böden in der Schweiz beträgt rund 32 Megatonnen Kohlenstoff, wobei sich die Kohlenstoffemissionen auf 0,14 bis 0,19 Megatonnen Kohlenstoff pro Jahr belaufen dürften. Diese Schätzungen sind jedoch sehr grob, da die Menge an SOC, die in organischen Böden in der Schweiz gespeichert ist, nicht genau bestimmt werden kann und die Moorgebiete nicht ausreichend kartiert wurden, um zuverlässige Informationen über die räumliche Ausdehnung und die derzeitigen Mächtigkeiten der Torfablagerungen liefern zu können. In einigen Gebieten des Gürbetals und des Rheintals können die Torfmächtigkeiten beispielsweise bis zu 20 Meter erreichen.

Massnahmen zur CO₂-Sequestrierung und zur Erhaltung des SOC

Nach heutigem Kenntnisstand kann die Erhaltung von natürlichen Hoch- und Flachmooren oder Torf aus drainierten landwirtschaftlich genutzten organischen Böden nur durch die Aufrechterhaltung eines hohen Wasserspiegels oder durch Wiedervernässung (Anhebung des Grundwasserspiegels) gewährleistet werden. Dabei handelt es sich um die einzige wirksame Massnahme zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Natürliche Torfmoore sind gesetzlich geschützt und werden wo nötig wiederhergestellt.

In der Schweiz könnten bei drainierten organischen Böden auch Massnahmen wie eine teilweise Wiedervernässung mit anschliessender Paludikultur, Tiefpflügen, das Abdecken der organischen Schichten mit mineralischem Bodenmaterial, das Vermischen von Torf mit mineralischem Bodenmaterial aus tieferen Schichten oder die Nutzung der Moorgebiete als Weideland oder Wald in Betracht gezogen werden, um die Zersetzung des Torfes und die Bodensackung zu verlangsamen und eine spätere Bewirtschaftung der organischen Böden zu ermöglichen.

Aufgrund der extrem langsamen Torfbildung sowohl in Hochmooren (einige Studien zeigen, dass der jährliche Torfzuwachs lediglich 0,5–1 mm beträgt²³) als auch in Flachmooren würde es mehrere hundert Jahre dauern, um eine Akkumulation von Kohlenstoff herbeizuführen, die eine Kohlenstoffsequestrierung bewirken würde. Massnahmen zur Erhaltung der OBS sind hingegen entscheidend, um eine Verminderung der THG-Emissionen und die Bewahrung der Biodiversität zu ermöglichen.

Sequestrierungspotenzial

Die sehr langsame Torfbildung hat zur Folge, dass organische Böden nur ein sehr geringes Potenzial zur CO₂-Sequestrierung haben. Aufgrund der vielen Unbekannten, die oben beschrieben wurden, und der begrenzten Kenntnisse und Erfahrungen in Bezug auf die Wiedervernässung von insbesondere landwirtschaftlich genutzten Flächen ist keine allgemeine Schätzung des potenziellen Wiedervernässungsgebiets möglich. Die Wiedervernässung aller organischen Ackerböden in der Schweiz würde den Verlust der entsprechenden landwirtschaftlichen Produktion nach sich ziehen und Emissionen in der Grössenordnung von höchstens 0,7 Megatonnen CO₂-Äquivalenten pro Jahr einsparen.

3.2.2 Landwirtschaftlich genutzte mineralische Böden

Gegenwärtige Ausdehnung der Flächen mit landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden und darin gespeicherte SOC-Vorräte

Die Fläche der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden in der Schweiz, einschliesslich der Sömmerungsgebiete, beläuft sich auf rund 1 452 000 Hektaren. Die Landwirtschaftsflächen nehmen zugunsten der Ausdehnung von Siedlungs- und Infrastrukturf lächen (63 %) und Waldflächen (20 %) sowie infolge von Nutzungsaufgaben in Sömmerungsgebieten (17 %) kontinuierlich ab.²⁴ Zwischen 1985 und 2018 schrumpften die landwirtschaftlich genutzten Flächen um 7 Prozent. Allerdings ist zu beachten, dass das Siedlungswachstum, also die Versiegelung des Bodens, zwar zu einem Verlust der ökologischen Funktionen des Bodens und von SOC führt, die Vergrösserung der Waldfläche jedoch in der Regel einen Zuwachs von SOC und damit eine Kohlenstoffsequestrierung ermöglicht.

Es gibt keine Messungen der SOC-Vorräte in landwirtschaftlich genutzten Böden für die gesamte Schweiz. Sie können jedoch anhand verschiedener Datenquellen geschätzt werden, wobei sich die Ergebnisse zwischen den verschiedenen Ansätzen und untersuchten Regionen annähern. Der geschätzte SOC-Vorrat in den obersten 30 Zentimetern von landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden beträgt etwa 77 Megatonnen Kohlenstoff. Die Zahlen in Tabelle 1 zeigen, dass die SOC-Vorräte in mineralischen Ackerböden vorwiegend in tiefen bis mittlere Höhenlagen zu finden sind, während insbesondere in höheren Lagen die Böden von Dauerwiesen viel mehr zu den SOC-Vorräten beitragen.

Tabelle 1: Geschätzte SOC-Vorräte in landwirtschaftlich genutzten Ackerböden und Dauerwiesen nach Höhenlage.

Höhenlage	Ackerböden (Mt C)	Dauerwiesen (Mt C)
< 600 m	14	9
600–1200 m	6	22
> 1200 m	0,02	26
TOTAL	20	57

Massnahmen zur CO₂-Sequestrierung und zur Erhaltung des SOC

Verschiedene landwirtschaftliche Praktiken können zur Erhaltung und Erhöhung der SOC-Vorräte in Ackerböden beitragen. Dazu gehören die Methoden der konservierenden Landwirtschaft, die eine reduzierte Bodenbearbeitung, organische Düngung und eine weite Fruchtfolge umfassen und einen jährlichen SOC-Zuwachs von 0,4 bis 0,8 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare ermöglichen. Allerdings handelt es

²³ Siehe z. B.: Borren, W., Bleuten, W. & Lapshina, E. D. (2004). Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia. *Quaternary Research*, 61(1).

²⁴ [Arealstatistik Schweiz. Erhebung der Bodennutzung und der Bodenbedeckung. \(Ausgabe 2019 / 2020\) | Publikation | Bundesamt für Statistik \(admin.ch\)](#).

sich dabei nicht um Sequestrierungsmassnahmen an sich, da der in den Boden eingebrachte Kohlenstoff nur zum Teil der Atmosphäre über den entsprechenden landwirtschaftlichen Flächen entzogen wurde. Echte Massnahmen zur Kohlenstoffsequestrierung in der Schweiz wären Folgende: Einführung einer dauerhaften Pflanzendecke (+0,3 t C pro ha und Jahr), Agroforstsysteme (+0,9 t C pro ha und Jahr), Tiefpflügen bestehender SOC-Vorräte (+0,9 t C pro ha und Jahr), Einbringung von Pflanzenkohle (siehe Kasten *Pflanzenkohle*) oder Änderung der Bodennutzung von Ackerboden zu Dauerwiese (+0,7 t C pro ha und Jahr). Diese Massnahmen können nicht alle auf derselben Fläche angewendet werden, weshalb ihr Sequestrierungspotenzial nicht kumulativ ist. Die Umsetzbarkeit und Sinnhaftigkeit einiger dieser Massnahmen (z. B. Tiefpflügen, Einbringung von Pflanzenkohle) müssen noch untersucht werden. Andere Bodenschutzmassnahmen zur Erhaltung des im Boden gebundenen Kohlenstoffs oder zur Sequestrierung von CO₂ (z. B. eine optimale Bodenbedeckung) sind hingegen bereits heute in der Direktzahlungsverordnung²⁵ (DZV) erwähnt.

Dauerwiesen bedecken etwa 70 Prozent der landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden in der Schweiz und weisen daher bereits relativ grosse SOC-Vorräte auf. Das Potenzial der SOC-Sequestrierung ist aufgrund der erheblichen Wissenslücken nur schwer schätzbar.

Da Ackerböden und Wiesen ein breites Spektrum an klimatischen Bedingungen abdecken und sehr unterschiedlich bewirtschaftet werden, sollten die Massnahmen auf jeden Fall standortspezifisch bewertet werden.

Sequestrierungspotenzial

Das Potenzial zur CO₂-Sequestrierung in landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden, Ackerböden oder Dauerwiesen ist nicht bekannt. Schätzungen des Sequestrierungspotenzials hängen von detaillierten Informationen über die aktuelle Bewirtschaftung und von Informationen über den Boden in Form von Bodenkarten ab. Solche Daten fehlen jedoch bisher auf nationaler Ebene.

Im Allgemeinen bringt eine Erhöhung der SOC-Vorräte bedeutende Vorteile für die Bodenfruchtbarkeit mit sich. Die organische Substanz verleiht den Böden Eigenschaften, die das Erosionsrisiko verringern, das Potenzial zur Rückhaltung von Wasser und Nährstoffen erhöhen und eine funktionsfähige Biodiversität fördern. Die Widerstandsfähigkeit und die Resilienz der Böden gegenüber externen Störeinflüssen (z. B. Klimawandel) nehmen zu. Die verschiedenen angewandten landwirtschaftlichen Massnahmen sind jedoch reversibel, was bedeutet, dass die dauerhafte SOC-Sequestrierung nicht gewährleistet ist. Ausserdem treten Zielkonflikte auf, wie beim Einsatz von Herbiziden in der konservierenden Landwirtschaft oder beim Wechsel von der Nahrungs- zur Futtermittelproduktion bei der Umwandlung in Wiesen, was sich negativ auf die THG-Bilanz auswirken kann (z. B. durch Vieh verursachte Emissionen).

Es ist unwahrscheinlich, dass Böden, die bereits jetzt nach guter landwirtschaftlicher Praxis bewirtschaftet werden, im Verhältnis zu ihren aktuellen SOC-Vorräten stark zur vermehrten CO₂-Sequestrierung beitragen können. Böden, die gegenwärtig über einen geringen SOC-Vorrat verfügen, weisen hingegen ein erhebliches Sequestrierungspotenzial auf.

Optimaler Gehalt an organischem Kohlenstoff für landwirtschaftlich genutzte mineralische Böden

Die Bodenstrukturqualität²⁶ und das OBS-Ton-Verhältnis verhalten sich proportional zueinander: Je tonhaltiger ein Boden ist, desto mehr organische Substanz (OS) ist erforderlich, um eine gute Struktur zu erreichen. Ein OBS-Ton-Verhältnis von 0,24 deutet auf eine sehr gute Struktur hin, während ein Verhältnis von 0,12 bedeutet, dass der Boden degradiert und OBS-arm ist (Abb. 6). So ist **ein optimaler Gehalt an OS (oder organischem Kohlenstoff) in Abhängigkeit vom Tongehalt des Bodens anzugeben.**

²⁵ SR 910.13

²⁶ Die Bodenstruktur ist die Art und Weise, wie die festen Bodenpartikel angeordnet sind und dabei Aggregate bilden oder nicht. Stabile Aggregate ermöglichen die Zirkulation von Luft und Wasser und fördern die Durchwurzelung der Vegetation sowie die biologische Aktivität.

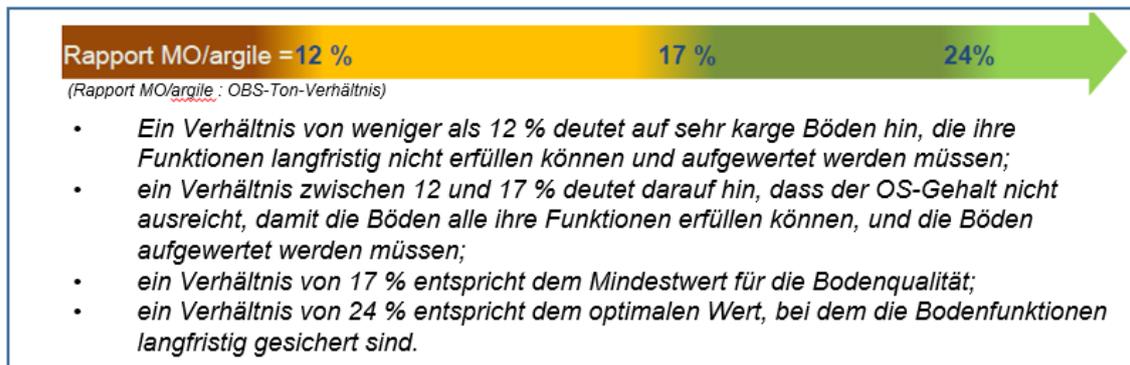


Abbildung 6: Schwellenwerte für die Empfindlichkeit der Böden in Bezug auf ihr Verhältnis OS zu Ton (Vorstudie über die Qualität landwirtschaftlich genutzter Böden und die Sequestrierung von organischem Kohlenstoff für den kantonalen Klimaplan Waadt²⁷, siehe Kasten *Kantonaler Klimaplan Waadt*).

Kantonaler Klimaplan Waadt

Die strategische Massnahme Nr. 9 des Klimaplans des Kantons Waadt (Sequestrierung von organischem Kohlenstoff in Böden) sieht vor, eine widerstandsfähige und resiliente Landwirtschaft zu fördern, die auf langfristig fruchtbaren Böden basiert.²⁸ In diesem Rahmen wurden in einer Vorstudie zu den Potenzialen und Praktiken der Akkumulation von organischem Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Böden konkrete Potenziale und praxisorientierte Hebel identifiziert, die eine signifikante Anreicherung von organischer Substanz in den Böden ermöglichen. Die Studie zeigt, dass die Mehrheit der Ackerböden im Kanton Waadt ein OBS-Defizit aufweisen: Etwa 75 Prozent der analysierten Parzellen erreichen den Mindestwert von 17 Prozent für das OBS-Ton-Verhältnis nicht. Diese Quote deutet auf einen ungenügenden OBS-Gehalt hin (siehe Abb. 6), der durch geeignete landwirtschaftliche Praktiken erhöht werden könnte. Dieses OBS-Defizit ist auf die intensiven Bewirtschaftungsmethoden zurückzuführen, die nach dem Zweiten Weltkrieg eingeführt wurden und zu einer Mineralisierung der OBS geführt haben, wie zum Beispiel intensives Pflügen, Entfernen von Ernterückständen, Vereinfachung der Fruchtfolgen sowie Trennung von Landwirtschaft und Viehzucht. Dank der Zielvorgabe, ein minimales OBS-Ton-Verhältnis von 17 Prozent zu erreichen, könnten bis 2050 mindestens 2 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalente in den rund 50 000 Hektaren landwirtschaftlich genutzter Ackerböden gespeichert werden. Eine Erhöhung des Sequestrierungsziels (z. B. OBS-Ton-Verhältnis von 20 % oder 24 %) hätte eine Verdoppelung oder Verdreifachung der sequestrierten Menge zur Folge, d. h. auf 4 bis 6 Millionen Tonnen auf denselben Flächen.

In den Kantonen Waadt, Freiburg und Bern zeigt die Beurteilung der Bodenstruktur (STRUDEL-Projekt²⁹), die mit dem OBS-Ton-Verhältnis in landwirtschaftlich genutzten Böden korreliert, dass einige gepflügte Böden eine mittlere bis gute Struktur mit zufriedenstellenden bis guten OBS-Gehalten aufweisen, während andere eine degradierte Struktur und einen niedrigen OBS-Gehalt haben. Dasselbe kann für nicht gepflügte Ackerböden festgestellt werden.

Für fast alle landwirtschaftlichen Massnahmen gibt es nur wenige oder keine Daten über die Auswirkungen der Bewirtschaftung auf mehr als 30 Zentimeter tiefe Bodenhorizonte. Die CO₂-Sequestrierung als Massnahme gegen die Auswirkungen des Klimawandels muss die gesamthafte Kohlenstoffspeicherung bis in die tiefen Bodenschichten berücksichtigen und nicht nur die Veränderungen des SOC-Vorrats in der Ackerkrume (oberste 20–30 cm des Bodens). Daher sind Empfehlungen, die nur auf Massnahmen beruhen, die sich auf die Ackerkrume auswirken, mit Vorsicht zu geniessen.

²⁷[210217 Résumé Qualité des sols et séquestration de carbone organique - synthèse et recommandations.pdf \(vd.ch\)](#)

²⁸[202006 Plan climat.pdf \(vd.ch\)](#)

²⁹[STRUDEL 2021.pdf](#)

3.2.3 Waldböden

Gegenwärtige Ausdehnung der Flächen mit Waldböden und darin gespeicherte SOC-Vorräte

Mit einer Fläche von 1 313 000 Hektaren bedecken die Wälder rund einen Drittel unseres Landes. In den letzten zehn Jahren ist die Waldfläche um etwa 1,6 Prozent gewachsen. In der Schweiz werden die Wälder hauptsächlich als Dauerwald (Plenterbetrieb) bewirtschaftet, was zu einer naturnahen Waldstruktur führt. Aufgrund der hohen Kosten der Holzernte und der geringen Gewinnspannen hat die Intensität der Waldbewirtschaftung in den letzten Jahrzehnten abgenommen. Infolgedessen zeichnen sich die Schweizer Wälder durch ein hohes Durchschnittsalter der Bäume (mehr als ein Viertel ist über 120 Jahre alt) und die europaweit höchste Biomasse der Bestände aus. Dadurch kann mehr OBS im Boden gespeichert werden als in intensiv bewirtschafteten Wäldern.

Die SOC-Vorräte in den Schweizer Waldböden zählen zu den höchsten in Europa und nähern sich aufgrund der geringen Bewirtschaftungsintensität und des natürlichen kalten und feuchten Klimas der SOC-Sättigung. Von der Bodenoberfläche bis zum Grundgestein sind durchschnittlich 143 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare gespeichert – das sind 20 Prozent mehr als die lebende Biomasse des Waldes. Diese hohen SOC-Vorräte sind in einem zukünftig wärmeren Klima mit häufigeren Trockenperioden gefährdet. Unter den biogeografischen Regionen der Schweiz weisen die südlichen Alpen die höchsten und das zentrale Mittelland die niedrigsten SOC-Vorräte pro Hektare auf.

Massnahmen zur CO₂-Sequestrierung und zur Erhaltung des SOC

Waldbewirtschaftungspraktiken, die auf eine Erhöhung der SOC-Vorräte abzielen, wie die Förderung einer grossen Baumvielfalt, sind für Schweizer Wälder gesetzlich vorgeschrieben und wirken sich positiv auf die Biodiversität und die Bodenfunktionen aus.

Eine Intensivierung der Waldbewirtschaftung würde wahrscheinlich zu einem Rückgang der SOC-Vorräte führen. Die dadurch entstehenden SOC-Verluste werden etwa 15-mal höher als die derzeitige Kohlenstoff-Senkenkapazität geschätzt. Gleichzeitig würde die derzeit hohe Biodiversität in den Schweizer Wäldern vermindert. Die Bewaldung von Gebieten, die nicht mehr landwirtschaftlich genutzt werden, findet bereits auf nicht bewirtschafteten Alpflächen statt und stellt keine zusätzliche Massnahme zur CO₂-Sequestrierung dar. Bei der Bewaldung von ehemaligen Wiesen sind die potenziellen Auswirkungen auf den SOC-Vorrat in mineralischen Waldböden vernachlässigbar und in organischen Böden sogar negativ. Die positiven Auswirkungen beschränken sich auf ehemalige Ackerböden – hier entsteht allerdings ein Konflikt mit der Nahrungsmittelproduktion. Durch die Kalkung von Waldböden zur Umkehrung der anthropogenen Bodenversauerung können je nach Bedingungen und Standort günstigere Voraussetzungen für die Sequestrierung von Kohlenstoff herbeigeführt werden.

Sequestrierungspotenzial

Neben den physikalisch-chemischen Eigenschaften beeinflusst auch der Waldtyp selbst die SOC-Vorräte. Diese sind in Böden unter Nadelbäumen höher als unter Laubbäumen. In Bezug auf die SOC-Speicherung sind die Auswirkungen im Zusammenhang mit dem Waldtyp (Nadel-, Laub-, Mischwald) jedoch hauptsächlich auf die oberen Schichten der Waldböden beschränkt, und eine erhebliche CO₂-Sequestrierung in Waldböden scheint kaum möglich.

3.2.4 Siedlungsböden

Gegenwärtige Ausdehnung der Flächen mit Siedlungsböden und darin gespeicherte SOC-Vorräte

Gemäss der Bodennutzungsstatistik des Bundesamts für Statistik (BFS) beträgt der Anteil der Siedlungen an der Gesamtfläche der Schweiz 7,9 Prozent.³⁰ Zu den Siedlungs- und Infrastrukturflächen gehören nicht nur die Gebäude, sondern auch Strassen und Eisenbahnlinien sowie die Bereiche entlang dieser Strecken, Flughäfen, Ver- und Entsorgungseinrichtungen (Infrastrukturgebiete) sowie Parks und Gärten. Während 64 Prozent dieser Böden von Bauten oder versiegelten Flächen bedeckt sind, verbleiben rund 118 000 Hektaren offene Siedlungsböden. Diese offenen Flächen bestehen hauptsächlich aus jungen, künstlich geschaffenen Böden, die dementsprechend in der Regel eine schwache Bodenentwicklung aufweisen (geringe Mächtigkeit, wenig biologische Aktivität, tiefer SOC-Gehalt etc.). Bei Baustellen werden die Bodenschichten in der Regel vor den Arbeiten, die zur Versiegelung führen (z. B. Bau von Strassen oder Gebäuden), abgetragen und das Bodenmaterial wird an einem anderen Ort zum Anlegen neuer Böden oder zur Verbesserung der Qualität von bestehenden landwirtschaftlich genutzten Böden verwendet. Aufgrund des Mangels an Bodenkarten basieren Schätzungen des SOC-Gehalts von Siedlungsböden ausschliesslich auf Literaturdaten, die im Ausland gesammelt wurden, sowie auf Daten aus land- und forstwirtschaftlich genutzten Gebieten. Auf der Grundlage dieser indirekten Daten sowie von Daten aus der Schweizer Arealstatistik ergibt sich ein theoretischer Durchschnittswert von etwa 60 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare. Die Gesamtmenge an SOC, die in den Böden der Siedlungen gespeichert ist, wird auf 7 Megatonnen Kohlenstoff geschätzt. Böden, die mit Krautvegetation (z. B. Rasen) bedeckt sind, tragen zu etwa der Hälfte des SOC-Vorrats bei, während bewaldete Gebiete oder solche mit Strauchvegetation ungefähr einen Viertel ausmachen.

Massnahmen zur CO₂-Sequestrierung und zur Erhaltung des SOC

Zu den möglichen Massnahmen, um den SOC-Vorrat in Siedlungsböden zu erhöhen, gehören strukturelle Anpassungen wie die Begrünung von Flachdächern oder die Entsiegelung von Flächen. Angepasste Bewirtschaftungsmassnahmen für Grünflächen wie Rasen können zu einer Erhöhung des SOC-Vorrats führen: Rasenschnitt oder Blätter von Bäumen und Sträuchern, die liegengelassen werden, reichern den Boden mit organischer Substanz an und verringern zudem den Bedarf an Düngemitteln. Auf künstlich angelegten Flächen mit kaum entwickelten Böden könnte die Bodenbildung (Bodenentwicklung) ebenfalls zu einer SOC-Sequestrierung führen. Eine denkbare Massnahme wäre auch die Speicherung von Kohlenstoff unter versiegelten Flächen wie Strassen. Die meisten Massnahmen in der Siedlungsbodengestaltung sind mit relativ hohen Ausgaben verbunden, bringen aber neben der Kohlenstoffsequestrierung oft auch weitere Vorteile mit sich. Mehr begrünte Flächen (Dächer, Erhaltung von unverbauten Böden, Entsiegelung von Flächen) wirken sich positiv auf das lokale Stadtklima aus, indem sie die Bildung von Hitzeinseln reduzieren und die örtliche Biodiversität fördern. Die Verwendung von Baumsubstraten mit Pflanzenkohle (siehe Kasten *Pflanzenkohle*) wirkt sich positiv auf die Wasseraufnahme und -speicherung aus und ist bei der Pflanzung von neuen Bäumen nicht wesentlich aufwändiger als herkömmliche Methoden.

Sequestrierungspotenzial

Das Potenzial von Dachbegrünungen zur CO₂-Sequestrierung liegt bei etwa 0,02 Megatonnen Kohlenstoff pro Jahr. Die Bodenentwicklung auf künstlich angelegten Flächen könnte eine Sequestrierung in ähnlicher Grössenordnung bewirken. Für Grünflächen mit differenzierter Bewirtschaftung kann das Sequestrierungspotenzial nicht quantifiziert werden, da keine Referenzwerte vorliegen. Die Ausbringung von Pflanzenkohle unter neu gebauten Strassen könnte theoretisch in den nächsten 20 Jahren rund 2,2 Megatonnen Kohlenstoff binden. Allerdings ist der Aufbau künstlicher Senken mit Pflanzenkohle unter versiegelten Strassenbelägen derzeit sehr kostspielig und daher wirtschaftlich nicht tragbar. Damit der Einsatz von Pflanzenkohle als Sequestrierungsmassnahme in Betracht gezogen werden kann,

³⁰ [Die Bodennutzung in der Schweiz – Resultate der Arealstatistik 2018 | Publikation | Bundesamt für Statistik \(admin.ch\)](#).

müsste die Pflanzenkohle aus Biomasse hergestellt werden, die an dem Ort angebaut wurde, an dem sie verwendet wird.

3.2.5 Natürliche mineralische Böden

Gegenwärtige Ausdehnung der Flächen mit natürlichen mineralischen Böden und darin gespeicherte SOC-Vorräte

Natürliche mineralische Böden sind Böden von nicht bewirtschafteten Flächen wie alpinen Wiesen, Magerwiesen, Ruderalflächen oder Auengebieten. Die Fläche der «nicht kultivierten» oder natürlichen mineralischen Böden kann anhand der drei in der Arealstatistik enthaltenen Kategorien «Unproduktive Gras- und Krautvegetation» (213 000 ha), «Gebüsch, Strauchvegetation» (63 000 ha) und «Feuchtgebiete» (11 400 ha) geschätzt werden. Klammert man die Feuchtgebiete (welche die organischen Böden beinhalten) aus, so lässt sich die Gesamtfläche der natürlichen mineralischen Böden in der Schweiz mit rund 276 600 Hektaren beziffern. Informationen über diese Arten der Landnutzung sind generell äusserst lückenhaft.

Es sind nur wenige Messungen der SOC-Vorräte in natürlichen mineralischen Böden verfügbar. Die NABO listet unter den Dauerflächen lediglich einen Standort auf: eine Alpweide im Schweizerischen Nationalpark (2400 m. ü. M.), die seit 1914 nicht mehr bewirtschaftet wird. Im Jahr 2017 betrug der SOC-Vorrat des Oberflächenhorizonts (0–20 cm) dieses Standorts 63 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare. Seit 1988 ist der SOC-Gehalt leicht angestiegen, wobei diese Schätzungen mit einem hohen Mass an Unsicherheit behaftet sind. Im Allgemeinen weisen alpine Standorte hohe SOC-Vorräte auf, nämlich zwischen 100 und 150 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare bis zum Ausgangsgestein. Zum Beispiel wurden in der Furka-Region über der Waldgrenze, d. h. auf einer Höhe zwischen 2285 und 2653 Metern über Meer, in den obersten 30 Zentimetern der Böden von fünf nicht bewirtschafteten Parzellen SOC-Vorräte zwischen 55 und 102 Tonnen Kohlenstoff pro Hektare gemessen.

Derzeit ist es nicht möglich, die SOC-Vorräte in natürlichen mineralischen Böden auf generelle Weise zu schätzen. Im Rahmen verschiedener Monitoringprojekte, wie beispielsweise dem Biodiversitätsmonitoring Schweiz (BDM-CH)³¹, könnten in den kommenden Jahren mehr Daten über Böden (insbesondere deren Gehalt an organischem Kohlenstoff) gesammelt werden, die eine fundierte Schätzung dieser Vorräte ermöglichen.

Massnahmen zur CO₂-Sequestrierung und zur Erhaltung des SOC

Natürliche Böden werden per Definition nicht für die Bedürfnisse der Menschen bewirtschaftet und ihr SOC-Vorrat wurde nicht durch anthropogene Aktivitäten verringert. Daher wurden keine spezifischen Massnahmen identifiziert, die eine hypothetische CO₂-Sequestrierung ermöglichen würden. Es muss jedoch sichergestellt werden, dass diese Böden weiterhin geschützt werden, um einen zukünftigen CO₂-Verlust zu vermeiden.

Sequestrierungspotenzial

Für natürliche mineralische Böden wurde kein Sequestrierungspotenzial identifiziert. Im Gegenteil: In alpinen Böden ist beispielsweise mit einem Verlust von SOC zu rechnen, da sich die Zersetzung des Humus infolge des Klimawandels beschleunigen dürfte.³²

³¹ [Home - Biodiversitätsmonitoring Schweiz](#)

³² Volk, M., Suter, M., Wahl, A. L., Bassin, S. (2022). Massive warming-induced carbon loss from subalpine grassland soils in an altitudinal transplantation experiment. *Biogeosciences*, 19(11), 2921-2937.

Pflanzenkohle

Definition: Unter Pflanzenkohle (PK, engl. Biochar) verstehen wir hier frisch «verkohlte» Biomasse aus unbehandeltem, holzigem Ursprung. Bei Pflanzenkohle, die in Böden eingebracht wird, handelt es sich in der Regel um Pyrolyse-Kohle, die bei hohen Temperaturen und unter Sauerstoffausschluss gebildet wird und einen hohen Kohlenstoffgehalt aufweist.

Klimawirksamkeit: Aufgrund ihrer chemischen Struktur ist Pflanzenkohle in Böden relativ lange stabil und trägt als zusätzlicher Kohlenstoffspeicher zum Klimaschutz bei.

Eigenschaften und Potenzial: Pflanzenkohle weist eine grosse spezifische Oberfläche auf, welche weitere günstige Eigenschaften mit sich bringt. Pflanzenkohle kann über eine Kaskade über Beimengung zu Viehfutter, als Einstreu und für Hofdünger genutzt werden und dabei mit Nährstoffen angereichert werden. So können Nährstoffe gespeichert und abgegeben werden und auch der Wasserhaushalt positiv beeinflusst werden. Jedoch konnte bisher auf Schweizer landwirtschaftlichen Böden kein steigender Effekt auf Erträge nachgewiesen werden, vornehmlich da die Schweizer Böden in der Regel eine gute Ausgangslage bieten. Durch das Einbringen von Pflanzenkohle in Böden könnte eine verringerte Nährstoffauswaschung folgen, sowie verringerte N₂O-Emissionen.

Risiken: Bei der Auswahl des Ausgangsmaterials und bei der Herstellung der Kohle muss sorgfältig vorgegangen werden. Beispielsweise können sich Schadstoffe wie Schwermetalle aus dem Ausgangsmaterial in der Kohle anreichern; auch sind optimale Pyrolyse-Bedingungen entscheidend um die Entstehung polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK), die umwelt- und gesundheitsgefährdend sind, zu minimieren. Unter Einhaltung des European Biochar Certificate (EBC) können derartige Risiken bei der (weittflächigen) Ausbringung von Pflanzenkohle auf Böden minimiert werden. Um in der Schweiz Pflanzenkohle als Dünger in Verkehr zu bringen ist das EBC Voraussetzung für eine Bewilligung durch das BLW. Auch für die private Herstellung für den Eigenbedarf und die Anwendung von Pflanzenkohle ist die Einhaltung der Vorgaben des EBC empfehlenswert, es besteht jedoch keine Bewilligungspflicht.

Offene Fragen: Es bestehen nach heutigem Wissen weitere potenzielle Risiken³³, die noch schwer einzuordnen sind; dazu zählen: Einflüsse auf physikalische, chemische und biologische Eigenschaften der Böden, Auswirkungen auf die Biodiversität (bspw. Regenwürmer können durch Pflanzenkohle nachteilig beeinflusst werden), Änderung der Albedo und damit des Wärmehaushalts, Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln. Für alle beschriebenen Chancen und Risiken fehlen langfristige Untersuchungen im Feldmassstab (insbesondere unter Schweizer Bedingungen), die Effekte aufzeigen könnten, die mit einer Alterung der Kohle und einem entsprechend veränderten System Boden auftreten könnten. Ebenso fehlen systematische Betrachtungen dazu, ob die Produktion (inkl. energetische Nutzung) und Anwendung von Pflanzenkohle gesamthaft eine bessere Ökobilanz aufweisen, als etablierte Nutzungen organischer «Abfälle» (z.B. Einarbeiten von Ernterückstände), die in Konkurrenz stehen.

Potenzial: Ausgehend von holzartigem Ausgangsmaterial wird ein – zeitlich begrenztes – Kohlenstoffspeicherungspotenzial mittels Pflanzenkohle für Flächen, die gedüngt werden dürfen (Acker-, Weideland und Alp sowie Obst-/Reb-/Gemüsebau) von 0,90–1,16 Mt CO₂-eq pro Jahr geschätzt³⁴. Laufende Studien deuten auf niedrigere Potentiale hin. Alternativ könnte ein Teil der Biomasse anderweitig eingesetzt werden: Für technische Böden in Siedlungsgebieten (Stadtbäume) werden weitere 0,21 Mt CO₂-eq pro Jahr geschätzt; für neu gebaute Strassen werden weitere 0,24 Mt CO₂-eq pro Jahr geschätzt¹.

³³ UBA 2016: [Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer «veränderter» Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden | Umweltbundesamt](#).

Agro Clean Tech Verein 2017: Pflanzenkohleeinsatz in der Landwirtschaft. Einsatzbereiche und Wirtschaftlichkeit von Pflanzenkohle als Klimamassnahme. Juli 2016. Florence Looser AgroCleanTech Verein. https://agrocleantech.ch/images/Fachleute/Wissen/Pflanzenkohleeinsatz_in_der_Landwirtschaft_als_Klimamassnahme.pdf.

Faktenblatt: Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft – Risiken und Chancen für Boden und Klima. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Arbeitsgruppe Interventionswerte und Risikobeurteilung (AGIR) des Cercle Sol. https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/faktenblatt-pflanzenkohle-2022.pdf.download.pdf/D_Faktenblatt_Pflanzenkohle.pdf.

³⁴ Schmidt et al. 2021: Hans-Peter Schmidt, Nikolas Hagemann, Fredy Abächerli, Jens Leifeld, Thomas Bucheli, 2021: Pflanzenkohle in der Landwirtschaft – Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science*, 112, 2021, 1-71. DOI: <https://doi.org/10.34776/as112g>.

3.3 Zusammenfassende Beurteilung des Sequestrierungspotenzials und der möglichen Massnahmen

Eine Übersicht über die SOC-Vorräte in Schweizer Böden nach Nutzung und/oder Typ des Bodens und über die Beurteilung des Potenzials zur Erhaltung des SOC oder zur CO₂-Sequestrierung findet sich in Tabelle 2.

Organische Böden machen zwar nur einen geringen Anteil an der Gesamtfläche der Schweiz aus, weisen aber im Verhältnis zu ihrer Fläche einen beträchtlichen SOC-Vorrat auf (32 Mt C). Es ist von entscheidender Bedeutung, dass Verluste vermieden und gegenwärtige Vorräte erhalten werden. Organische Böden müssen insbesondere nach ihrer Nutzung unterschieden werden. Die Erhaltung des SOC in naturnahen Moorlandschaften (Hoch-, Flach- und Übergangsmoore im Biotopinventar) erfolgt in erster Linie durch den Schutz und die Wiederherstellung dieser Biotope.³⁵

Landwirtschaftlich genutzte organische Böden speichern zwar grosse Mengen an SOC, aber die derzeitigen Verlustraten sind hoch. Bevor also ihr Potenzial zur CO₂-Sequestrierung berücksichtigt werden kann, muss der Fokus auf die Reduktion der Emissionen durch geeignete Techniken, insbesondere durch die Stabilisierung der organischen Substanz, gelegt werden.

Landwirtschaftlich genutzte Böden, die rund einen Drittel der Fläche der Schweiz ausmachen, sind mit insgesamt 77 Megatonnen Kohlenstoff in Ackerböden und in Dauerwiesen (20 bzw. 57 Mt C, siehe Tabelle 1) der zweitgrösste Speicher für organischen Kohlenstoff. Während die Böden von Dauerwiesen im Allgemeinen einen hohen Kohlenstoffgehalt und ein geringes Potenzial zur CO₂-Sequestrierung aufweisen, ist die Situation bei Ackerböden viel differenzierter, abhängig von den Bodeneigenschaften und den landwirtschaftlichen Praktiken.

Landwirtschaftlich genutzte mineralische Böden bieten aufgrund ihres Zustands und ihrer umfangreichen Fläche das grösste Potenzial zur SOC-Sequestrierung. Eine in den Kantonen Genf und Waadt durchgeführte Studie³⁶ zeigte ein SOC-Defizit zwischen 30 und 70 Prozent im Vergleich zu den Anforderungen an eine minimale Bodenstrukturqualität (OBS-Ton-Verhältnis von 12 %); das Defizit des gesamten SOC-Vorrats wurde auf 0,18 Megatonnen bzw. 0,55 Megatonnen C-Äquivalente geschätzt.

Die Prinzipien der konservierenden Landwirtschaft sind besonders geeignet, um den SOC-Vorrat zu erhalten und zu erhöhen. Dazu gehören insbesondere eine möglichst weite Fruchtfolge mit einem hohen Anteil an Kunstwiese, organische Düngung (einschliesslich Gründüngungen), die Wiederverwertung von Pflanzenrückständen sowie eine reduzierte Bodenbearbeitung. Diese Massnahmen erhöhen den Eintrag von organischer Substanz in den Boden und verzögern gleichzeitig deren Zersetzung.

Schätzungen zufolge lagern die grössten SOC-Vorräte der Schweiz in **Waldböden** (188 Mt C). Zurückzuführen ist dies zum einen auf den Anteil der Wälder an der Gesamtfläche des Landes (ca. 33 %) und zum anderen auf die Art der Waldbewirtschaftung (Plenterwald), welche die Wälder in einem naturnahen Zustand erhält. Folglich weisen Waldböden ein (sehr) geringes Potenzial zur CO₂-Sequestrierung auf.

Siedlungsböden bieten eine interessante Möglichkeit zur SOC-Sequestrierung, das potenzielle Gebiet dafür ist jedoch eher klein.

Eine allgemeine Schätzung der SOC-Vorräte in **natürlichen mineralischen Böden** ist aufgrund fehlender Daten nicht möglich. Ausserdem wurden für diese Böden, die per Definition nicht für die Bedürfnisse der Menschen bewirtschaftet werden, kein Sequestrierungspotenzial und auch keine Massnahmen identifiziert.

³⁵ [Moorlandschaften von nationaler Bedeutung \(admin.ch\)](#)

³⁶ Dupla, X., Gondret, K., Sauzet, O., Verrecchia, E., & Boivin, P. (2021). Changes in topsoil organic carbon content in the Swiss leman region cropland from 1993 to present. Insights from large scale on-farm study. *Geoderma*, 400, 115125.

Tabelle 2: SOC-Vorräte nach Nutzung und/oder Typ des Bodens, Potenzial zur Erhaltung des SOC oder zur CO₂-Sequestrierung gemäss Einschätzung von Fachleuten: G = gering; D = durchschnittlich; E = erheblich; nb = nicht bekannt; nr = nicht relevant.

Bodentyp und -nutzung	Aktuelle Fläche (Mio. ha)	Aktueller Zustand des SOC			Erhaltungspotenzial	Sequestrierungspotenzial
		Gehalt (t C/ha)	Vorrat (Mt C)	Entwicklungsdynamik		
Organische Böden (Kap. 3.2.1)	0,03	1000–1500	32	<u>Landwirtschaftlich genutzt</u> Hohe Verluste	Landwirtschaftlich genutzt E	Landwirtschaftlich genutzt nb
				<u>Natürlich</u> Durchschnittliche Verluste	Natürlich E	Natürlich G
Landwirtschaftlich genutzte mineralische Böden (Kap. 3.2.2)	1,45	50–60	77	Auf durchschnittlichem Niveau stabil ³⁷	D	D
Waldböden (Kap. 3.2.3)	1,31	143	188	Auf hohem Niveau stabil	D	G
Siedlungsböden (Kap. 3.2.4)	0,12	60	7	Anthropogen	nb	G
Natürliche mineralische Böden (Kap. 3.2.5)	0,28	nb	nb	Stabil	nr	nr

3.4 Zusammenfassung der Massnahmen zur Erhaltung des SOC und zur CO₂-Sequestrierung in Böden

Allgemeine Massnahmen zur Erhöhung des SOC-Gehalts wurden im technischen Bericht¹ über die Analyse des Potenzials zur Kohlenstoffsequestrierung in Böden und über Massnahmen zur Steigerung dieses Potenzials identifiziert (Tabelle 3).

Derzeit ist es aufgrund von Wissenslücken nicht möglich, einen umfassenden Katalog an Massnahmen für die verschiedenen Bodentypen und Bodennutzungen zu erstellen oder deren Wirksamkeit zu bestimmen; ihre Durchführbarkeit und Zweckmässigkeit müssen beurteilt werden.

Obwohl Moore unter dem Schutz der Bundesverfassung stehen, verschlechtert sich die ökologische Qualität zahlreicher Moorlandschaften von nationaler Bedeutung, und **natürliche organische Böden**

³⁷ Eine Durchschnittsbewertung deckt eine grosse Vielfalt von Situationen ab, die sich in Bezug auf die Nutzung (Dauerwiesen oder Ackerflächen) oder die landwirtschaftlichen Praktiken unterscheiden.

verlieren weiter an SOC. Das BAFU hat Empfehlungen zur Regeneration von Moorbiotopen, insbesondere Hochmooren, veröffentlicht.³⁸ Allerdings sind bisher zu wenige Projekte angelaufen.³⁹ Trotz einiger Pilotversuche kann die Wirksamkeit geeigneter Massnahmen zum Aufhalten des Torfverlusts in **landwirtschaftlich genutzten organischen Böden**, die meist durch die Entwässerung von Flachmooren entstanden sind, noch nicht beurteilt werden.

In Anbetracht ihres Potenzials wurden Massnahmen zur Erhaltung oder Sequestrierung von Kohlenstoff in **landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden**⁴⁰ vertieft untersucht. Aufgrund der vielen Faktoren, die die SOC-Anreicherung beeinflussen (Bodeneigenschaften, landwirtschaftliche Praktiken etc.), müssen spezifische Massnahmen standortabhängig bewertet werden, und es können nur Empfehlungen allgemeiner Natur gemacht werden. Neuere Studien, die auf 120 Schweizer Betrieben in der Genferseeregion durchgeführt wurden, haben jedoch gezeigt, dass der Eintrag von organischer Substanz und die Intensität der Gründüngung mit jährlich über 4 Promille signifikant zur Erhöhung von SOC im Oberflächenhorizont beitragen.⁴¹

Es gibt nur wenige Informationen über die Erhaltung oder Erhöhung von SOC in **Waldböden** und sie betreffen hauptsächlich die Aufforstung mit schnellwachsenden Baumarten. Die Studien kommen zum Schluss, dass die Akkumulation von Kohlenstoff im Boden im Allgemeinen gering ist, verglichen mit der Zunahme von Kohlenstoff in der oberirdischen Biomasse.⁴² Allerdings sind SOC-Verluste im Zuge des Klimawandels wahrscheinlich, insbesondere wenn die Bewirtschaftungspraktiken nicht angepasst werden, wo dies möglich ist.

Auch wenn anerkannt wird, dass **Siedlungsböden** über Jahrhunderte hinweg SOC akkumulieren und folglich grosse Mengen Kohlenstoff sequestrieren könnten, sind die Prozesse und Mechanismen, die zu einer bedeutenden SOC-Anreicherung in Siedlungsböden führen, noch weitgehend unbekannt⁴³ und müssen erst noch in Versuchen erforscht werden.

³⁸ Regeneration von Hochmooren. Grundlagen und technische Massnahmen (BAFU 2009) [Regeneration von Hochmooren \(admin.ch\)](#).

³⁹ [Moore \(admin.ch\)](#)

⁴⁰ Soil carbon sequestration by agriculture: Policy options (2022) ([Soil carbon sequestration by agriculture: Policy options | en | OECD](#)).

⁴¹ Dupla, X., Lemaître, T., Grand, S., Gondret, K., Sauzet, O., Charels, R., Verrecchia, E., & Boivin, P. (2022). On-farm relationships between agricultural practices and annual changes in organic carbon content at a regional scale. *Frontiers in Environmental Science*, 10.

⁴² Jandl, R., Lindner, M., Vesterdal, L., Bauwens, B., Baritz, R., Hagedorn, F., ... & Byrne, K. A. (2007). How strongly can forest management influence soil carbon sequestration?. *Geoderma*, 137(3–4), 253–268.

⁴³ Vasenev, V., & Kuzyakov, Y. (2018). Urban soils as hot spots of anthropogenic carbon accumulation: Review of stocks, mechanisms and driving factors. *Land Degradation & Development*, 29(6), 1607–1622.

Tabelle 3: Zusammenfassung des technischen Berichts¹ über die Analyse des Potenzials zur Kohlenstoffsequestrierung in Böden und über Massnahmen zur Steigerung dieses Potenzials: Massnahmen zur Erhaltung des SOC oder zur CO₂-Sequestrierung in Böden nach Nutzung und/oder Typ des Bodens. Die Wirksamkeit und Zweckmässigkeit der identifizierten Massnahmen müssen beurteilt werden.

Bodentyp und -nutzung	Erhaltungsmassnahmen	Sequestrierungsmassnahmen
Organische Böden (Kap. 3.2.1)	<u>Landwirtschaftlich genutzt</u> <ul style="list-style-type: none"> > Abdeckung durch Erdmaterial oder mineralisches Material > Vermischung der Schichten (mit Tiefpflügen) > Paludikultur > Aufforstung > Beweidung 	<u>Landwirtschaftlich genutzt</u> Keine Massnahmen identifiziert
	<u>Natürlich</u> <ul style="list-style-type: none"> > Aufrechterhaltung eines hohen Wasserspiegels 	<u>Natürlich</u> <ul style="list-style-type: none"> > Anhebung des Wasserspiegels
Landwirtschaftlich genutzte mineralische Böden (Kap. 3.2.2)	<u>Ackerböden</u> <ul style="list-style-type: none"> > Reduzierte Bodenbearbeitung > Organische Düngung > Dauerhafte Bodenbedeckung > Angepasste Fruchtfolge 	<u>Ackerböden</u> <ul style="list-style-type: none"> > Reduzierte Bodenbearbeitung > Organische Düngung > Dauerhafte Bodenbedeckung > Angepasste Fruchtfolge > Agroforstwirtschaft > Ausbringung von Pflanzenkohle > Änderung der Bodennutzung (Ackerboden in Dauerwiese oder Wald)
	<u>Dauerwiesen</u> <ul style="list-style-type: none"> > Keine Änderung der Bodennutzung 	<u>Dauerwiesen</u> <ul style="list-style-type: none"> > Änderung der Bodennutzung (Dauerwiese zu Wald)
Waldböden (Kap. 3.2.3)	<ul style="list-style-type: none"> > Keine Intensivierung der Waldbewirtschaftung (z. B. Beibehaltung des Plenterwaldes) 	<ul style="list-style-type: none"> > Diversifizierung der Bestände > Aufforstung (auf Ackerböden)
Siedlungsböden (Kap. 3.2.4)	Nicht relevant	<ul style="list-style-type: none"> > Begrünung von Dächern > Angepasste Bewirtschaftungsmassnahmen für Grünflächen und Parks > Bäume pflanzen > Ausbringung von Pflanzenkohle
Natürliche mineralische Böden (Kap. 3.2.5)	Keine Massnahmen identifiziert	Keine Massnahmen identifiziert

3.5 Fazit

Eine detaillierte Beurteilung des Potenzials der Schweizer Böden zur Speicherung von organischem Kohlenstoff ist heute nicht möglich, da es an landesweiten Bodeninformationen mangelt. Eine Gesamtbewertung der verfügbaren Daten sowie der Daten aus internationalen Studien bestätigt, dass die SOC-Verluste in der Vergangenheit hauptsächlich auf die Änderung der Landnutzung zugunsten der landwirtschaftlichen Produktion (mineralische und organische Böden) und der Siedlungsentwicklung zurückzuführen sind.

Die Böden von Hoch- und Flachmooren sowie Feuchtgebieten bestehen aus einer dicken Torfschicht oder einer Schicht, die reich an organischer Substanz ist. Wenn sie nicht gestört werden, sind diese natürlichen organischen Böden wichtige SOC-Speicher. Diese speziellen Biotope machen etwa 2,6 Prozent der Landesfläche aus.⁴⁴ Seit die Schweizer Stimmbewölkerung im Jahr 1987 die Rothenthurm-Initiative angenommen hat, stehen Moore unter Schutz (Art. 78 Abs. 5 BV). Trotzdem verschlechtert sich die ökologische Qualität vieler geschützter Moorbiotope von nationaler Bedeutung, was ebenfalls zu SOC-Verlusten führt. Durch Massnahmen zur Aufwertung und Wiederherstellung von beeinträchtigten Mooregebieten, wie sie beispielsweise für Hochmoore³⁸ festgelegt wurden, sollen die Verluste eingedämmt und sogar eine gewisse Menge an zusätzlichem CO₂ gebunden werden; das Sequestrierungspotenzial ist jedoch relativ begrenzt, da der Torfbildungsprozess langsam abläuft und die betroffenen Flächen klein sind (ca. 13 000 ha in der Schweiz, siehe Kap. 3.2.1). Anders verhält es sich mit landwirtschaftlich genutzten organischen Böden (17 000 ha), die nicht unter Schutz stehen. Der Verlust an organischer Substanz in drainierten Torfböden ist nach wie vor sehr hoch und kann in menschlichen Zeiträumen als irreversibel erachtet werden. Dieser signifikante Torfverlust schadet einerseits dem Klima und gefährdet andererseits den Fortbestand der landwirtschaftlichen Betriebe. Massnahmen zur Erhaltung des Torfs müssen unter Berücksichtigung der Aspekte Produktion, Biodiversität, Klima, Wasserqualität und Hochwasserschutz beurteilt werden (siehe Kap. 6.1).

In der Schweiz wird der optimale SOC-Gehalt in zahlreichen landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden nicht erreicht. Daher besteht ein konkretes Potenzial für die Anreicherung von organischer Substanz in diesen Böden. Die landwirtschaftlichen Praktiken zur Erhaltung oder Erhöhung des SOC-Gehalts sind immer standortspezifisch und müssen je nach Bodeneigenschaften und agrarökologischen Bedingungen festgelegt werden.

Die Waldbewirtschaftung in der Schweiz verursacht nur geringe SOC-Verluste, und der Kohlenstoffgehalt der Waldböden entspricht weitgehend dem natürlichen Zustand. Das Potenzial für eine zusätzliche CO₂-Sequestrierung in diesen Böden wird daher als gering eingeschätzt.

Siedlungsböden machen nur einen kleinen Anteil der Fläche der Schweiz aus und haben auf nationaler Ebene deshalb ein geringes Potenzial zur CO₂-Sequestrierung. Auf lokaler Ebene ist dieses Potenzial jedoch nicht zu vernachlässigen. Darüber hinaus bringt eine Erhöhung des SOC-Gehalts in Siedlungsböden zahlreiche weitere Vorteile mit sich, wie die Milderung von Hitzewellen oder eine Zunahme der Biodiversität.

Das derzeitige Wissen reicht nicht aus, um die SOC-Vorräte in natürlichen Böden zu quantifizieren oder ihre Entwicklung angesichts des Klimawandels zu beurteilen.

Basierend auf den Schätzungen des aktuellen Zustands und der Entwicklung des SOC-Gehalts in Böden sowie des Sequestrierungspotenzials wurden zwei vielversprechende Leitlinien identifiziert: die Vermeidung von SOC-Verlusten in landwirtschaftlich genutzten organischen Böden und die Erhaltung oder Erhöhung des SOC-Gehalts in landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden (siehe Kap. 5).

⁴⁴ Zustand und Entwicklung der Moore in der Schweiz (BAFU 2007) ([admin.ch](#))

4 Gegenwärtige politische Instrumente, Anreizmechanismen und Wirtschaftlichkeit

4.1 Gesetzliche Rahmenbedingungen für die Kohlenstoffsequestrierung

Der **Bodenschutz** wird durch das Raumplanungsgesetz⁴⁵ (RPG) und das Umweltschutzgesetz⁴⁶ (USG) geregelt, die Bestimmungen zur Bodenbewirtschaftung enthalten. Das RPG hält fest, dass Bund, Kantone und Gemeinden dafür sorgen, «*dass der Boden haushälterisch genutzt wird*» (Art. 1 Abs. 1). Diese Eindämmung des Flächenverbrauchs (quantitativer Aspekt) ist ebenso wie der Schutz von Natur-, Wald- und Landwirtschaftsgebieten (qualitative Aspekte) mit den verstärkten Bemühungen zur CO₂-Sequestrierung vereinbar. Das USG zielt darauf ab, «*insbesondere die biologische Vielfalt und die Fruchtbarkeit des Bodens*» dauerhaft zu erhalten (Art. 1 Abs. 1). Damit sind die Grundlagen gegeben, um einen schonenden Umgang mit dem Boden zu gewährleisten. Allerdings kann es beim Vollzug zu Zielkonflikten zwischen rechtlichen Vorschriften kommen. So wird in der **Bodenstrategie Schweiz**⁹ betont, dass die gesetzlichen Bestimmungen in den einzelnen Bereichen auf Überschneidungen, Widersprüche und Zielkonflikte zu durchleuchten sind, damit ein kohärentes Regelwerk zustande kommt. Für die Landwirtschaft nennt die Bodenstrategie Schweiz als Ziel, die organische Substanz in landwirtschaftlich genutzten Böden zu erhalten («Kompensation des Verlusts von organischer Bodensubstanz infolge landwirtschaftlicher Nutzung mineralischer Böden»; «Minimierung des Verlusts von organischer Bodensubstanz infolge landwirtschaftlicher Nutzung organischer Böden»). Es wird darauf hingewiesen, dass der OBS-Verlust zwar in verschiedenen rechtlichen Bestimmungen Erwähnung findet (z. B. in der DZV²⁵), diese Bestimmungen allerdings ungenügend präzisiert sind und kein operables System für den Vollzug existiert.

Der strenge **Schutz der Moorlandschaften**, der im Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz⁴⁷ (Art. 23a ff. NHG) sowie in den spezifischen Verordnungen für diese Landschaften (Flachmoorverordnung⁴⁸, Hochmoorverordnung⁴⁹, Moorlandschaftsverordnung⁵⁰) verankert ist, trägt mit der Verpflichtung, Beeinträchtigungen bei jeder sich bietenden Gelegenheit zu beheben, direkt zur Erhaltung der bestehenden SOC-Vorräte und sogar zu einer CO₂-Sequestrierung bei.

Die **Waldpolitik 2020** legt den Schwerpunkt auf das Sequestrierungspotenzial von Wäldern, das durch die dauerhafte Zunahme des Holzvorrats und der Produktivität des Waldes sowie die vermehrte Förderung der nachhaltigen Verwendung von Holzprodukten, zum Beispiel im Bauwesen (der Kohlenstoff bleibt lange im Holz gespeichert, das im Gebäude verbaut wird), in der Schweiz oder im Ausland entsteht. Die Waldgesetzgebung enthält hingegen keine Ziele hinsichtlich der CO₂-Sequestrierung in Waldböden, obwohl die Waldpolitik 2020 fordert, dass in den Programmvereinbarungen zwischen Bund und Kantonen eine bodenschonende Waldbewirtschaftung berücksichtigt wird.

Mit der Änderung der **Gesetzgebung im Klimabereich** (CO₂-Verordnung⁵¹) vom 1. Juni 2022 wird festgelegt, dass die Bindung von Kohlenstoff in biologischen Speichern (Wald und Böden) als Kompensationsmassnahme fortan auf nationaler Ebene und unter bestimmten Bedingungen zulässig ist. So wird unter anderem verlangt, dass die Stärkung der natürlichen Leistungen der biologischen Kohlenstoffsinken nachhaltig und die Permanenz der Speicherung für mindestens 30 Jahre sichergestellt ist.

Die **Gesetzgebung im Agrarbereich** umfasst nicht direkt die CO₂-Sequestrierung in landwirtschaftlich genutzten Böden, auch wenn verschiedene agrarpolitische Instrumente die Wechselwirkungen zwischen

⁴⁵ SR 700

⁴⁶ SR 814.01

⁴⁷ SR 451

⁴⁸ SR 451.33

⁴⁹ SR 451.32

⁵⁰ SR 451.35

⁵¹ SR 641.711

Landwirtschaft und Umwelt (einschliesslich Klima) beeinflussen können. Allerdings werden im Rahmen des Landwirtschaftsgesetzes⁵² Massnahmen finanziert, die sich auf die Humusbildung auswirken. Insbesondere in Artikel 17 DZV²⁵ werden Bewirtschafterinnen und Bewirtschafter dazu angehalten, die Bodenqualität zu verbessern und zu erhalten (z. B. müssen Betriebe mit mehr als 3 Hektaren offener Ackerfläche auf jeder Parzelle mit Kulturen, die vor dem 31. August geerntet werden, im laufenden Jahr eine Winterkultur, Zwischenkultur oder Gründüngung ansäen). Mit einer optimalen Bodenbedeckung soll die Erosion oder Bodendegradation verhindert werden. Auch wenn sie dazu beiträgt, garantiert diese Bestimmung nicht, dass Massnahmen, die zu einer Erhöhung des SOC-Gehalts in landwirtschaftlich genutzten Böden und damit zu einer dauerhaften CO₂-Sequestrierung führen, angemessen umgesetzt werden. Um eine Subvention zu erhalten, sind nämlich weder anhaltende Bemühungen (über 5–10 Jahre) noch die Einhaltung aller für die Sequestrierung erforderlichen Massnahmen (z. B. der Verzicht auf das Pflügen oder die Bodenbedeckung) notwendig. Was die Erhaltung von SOC in drainierten organischen landwirtschaftlichen Böden betrifft, so kann bereits heute im Rahmen der Strukturverbesserungsverordnung⁵³ die Wiedervernässung von Flächen unterstützt werden, die nicht mehr konventionell bewirtschaftet werden.

Ein Teil der 13 Umweltziele Landwirtschaft, die das BAFU und das BLW gemeinsam festgelegt haben, betrifft den Bereich Boden. In einem Bericht aus dem Jahr 2016⁵⁴ wird der Zielerreichungsgrad beschrieben, wobei aufgrund mangelnder Kenntnisse keine umfassenden Aussagen zur Erreichung der bodenbezogenen Ziele möglich sind. Laut Bericht «ist der Handlungsbedarf bei Biodiversität, Treibhausgasen, Stickstoff und Bodenfruchtbarkeit besonders hoch». Die Verbesserung der Bodenqualität und die CO₂-Sequestrierung stellen gemeinsame Vorteile (Co-Benefits) der landwirtschaftlichen Tätigkeit dar.

4.2 Gegenwärtige formelle und informelle CO₂-Märkte

Formelle (oder verbindliche) Märkte

Formelle CO₂-Märkte sind Finanzmechanismen, die den Handel mit Emissionsrechten ermöglichen. Es handelt sich dabei um ein Instrument der öffentlichen Politik, mit dem die für die Klimaerwärmung verantwortlichen THG-Emissionen (hauptsächlich CO₂) reduziert werden sollen. Mithilfe dieses Instruments kann ein Akteur, der keinen Klimaverpflichtungen unterliegt, unter bestimmten Bedingungen seine Bemühungen zur Reduzierung des THG-Ausstosses an Akteure verkaufen, die diesen Verpflichtungen unterliegen. Einige Bereiche, wie die CO₂-Sequestrierung in Böden, lassen sich aus technischen Gründen nur schwer in formelle CO₂-Märkte einbeziehen. Die Messung und Kontrolle der Emissionen wird als komplex, unter Umständen unzuverlässig und kostspielig erachtet (siehe Kap. 4.4).

Informelle (oder freiwillige) Märkte

Die CO₂-Kompensation ist auch auf individueller oder freiwilliger Ebene möglich. Dank zahlreicher Plattformen (z. B. myclimate.ch) können Unternehmen oder Einzelpersonen einen Teil ihrer THG-Emissionen kompensieren, indem sie sich freiwillig an Projekten zur Emissionsverminderung beteiligen (z. B. im Bereich Aufforstung oder erneuerbare Energien).

Allerdings stellen sich bei der Funktionsweise freiwilliger Märkte die gleichen Fragen wie beim formellen Markt (Messung, Dauerhaftigkeit, Zusätzlichkeit). Freiwillige Märkte sind mit mehr Risiken behaftet, da die Kontrollen, die die Wirksamkeit der Bemühungen gewährleisten, schwächer sind. Dieses Risiko wird im Bereich der Kohlenstoffsequestrierung in Böden als sehr hoch eingestuft, da die Messmethoden nicht ausreichend etabliert sind und die Sequestrierung nur langsam voranschreitet (in der Regel müssen entsprechende landwirtschaftliche Praktiken während 5 bis 10 Jahren angewendet werden, bevor ein Anstieg des Kohlenstoffgehalts im landwirtschaftlich genutzten Boden gemessen werden kann). Dennoch gibt es einige Beispiele für freiwillige Märkte, die die Kohlenstoffsequestrierung in Böden fördern,

⁵² SR 910.1

⁵³ SR 913.1 (Art. 14 Abs. 1 Bst. c: Massnahmen zur Erhaltung und Verbesserung von Struktur und Wasserhaushalt des Bodens; Art. 14 Abs. 3 Bst. b: Anlagen zur Erhaltung und Verbesserung des Wasserhaushalts des Bodens nach Abs. 1 Bst. c).

⁵⁴ [Bericht BR D.pdf \(parlament.ch\)](#)

im Ausland und auch in der Schweiz (Tabelle 4); Letztere betreffen allerdings nur eine sehr kleine Fläche.

Tabelle 4: Kurzbeschreibung der in der Schweiz identifizierten informellen Märkte. Das Projekt AgroCO₂ncept Flaachtal ist kein Markt im eigentlichen Sinne, da keine Zertifikate ausgestellt und verkauft werden.

Projekt	Kurzbeschreibung	Betroffene Fläche
Bodenfruchtbarkeitsfonds (BIO Stiftung Schweiz)	Finanzielle und fachliche Unterstützung von Landwirtinnen und Landwirten (Abschliessen von Verträgen) <ul style="list-style-type: none"> - Pilotphase (2018–2022), 2. Phase geplant für 2023/24 - Fr. 6500.– bis Fr. 13 000.– pro Betrieb - Teilfinanzierung durch den Verkauf von CO₂-Zertifikaten auf freiwilligen CO₂-Märkten 	32 Betriebe, ca. 1000 ha
myclimate	Regeneration des Gross Moos im Schwändital (WSL-Projekt) ⁵⁵ <ul style="list-style-type: none"> - Verkauf von CO₂-Zertifikaten - Co-Finanzierung Bund und Kanton Glarus 	3 ha
CarboCert	Finanzielle Unterstützung und Corg-Analysen (Verträge mit Landwirtinnen und Landwirten) <ul style="list-style-type: none"> - Beprobung und Analysen - Erfolgsprämien (ca. Fr. 30.– pro % organische Substanz pro ha; ein Teil der Prämie wird nach 5 Jahren ausgezahlt) 	Keine Angaben
AgroCO ₂ ncept Flaachtal (vom Ressourcenprogramm BLW unterstütztes Projekt)	Verminderung der THG-Emissionen aus der Landwirtschaft <ul style="list-style-type: none"> - Einschliesslich CO₂-Sequestrierung (Direktsaat, Kompost, Pflanzenkohle) 	Keine Angaben

4.3 Mögliche Anreizmechanismen im Agrarsektor

Im Fachbericht² werden zwei Arten von möglichen Anreizmechanismen identifiziert: auf Praktiken oder auf Leistung basierend.

Mit den **auf Praktiken beruhenden Mechanismen** soll die Einführung von Produktions- und Bodenbearbeitungstechniken, die zur Kohlenstoffsequestrierung führen, gefördert werden. Dabei wird der Unterstützungsbetrag von den durch die Landwirtinnen und Landwirte getroffenen Massnahmen abhängig gemacht. Die tatsächlich erzielten Ergebnisse werden bei der Bestimmung der Subventionshöhe nicht berücksichtigt (**Handlungspflicht**).

Bei den **leistungsbasierten Mechanismen** sollen die Bemühungen zur Sequestrierung auf der Grundlage der festgestellten, gemessenen Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Boden vergütet werden. Es handelt sich dabei also um Anreizmechanismen, mit denen die Landwirtinnen und Landwirte abhängig von der erbrachten Leistung entlohnt werden, ohne dass die umgesetzten Massnahmen berücksichtigt werden (**Erfolgspflicht**). Obwohl leistungsbasierte Ansätze in Bezug auf die ökologische und wirtschaft-

⁵⁵ Begleitforschung zum Pilotprojekt *max.moor*. Anwendung des Kompensationsansatzes *max.moor* zur Wiedervernässung des Gross Moos im Schwändital, GL (Schlussbericht im Auftrag des BAFU, Dezember 2020).

liche Effizienz einen Vorteil bieten, sind sie gegenwärtig weniger akzeptiert als die auf Praktiken beruhenden Mechanismen.

Im Fachbericht wird klargestellt, dass die Einführung eines Anreizmechanismus Unterstützungsmassnahmen erfordert. Mit diesen sollen Landwirtinnen und Landwirte informiert und geschult werden, gleichzeitig dienen sie aber auch der Förderung der Forschung und dem Testen von Programmen (Pilotprogramme). Das Verhalten der Landwirtinnen und Landwirte wird sowohl von ihrem Wissen über die Umweltauswirkungen und die Massnahmen zu deren Bewältigung als auch von den wirtschaftlichen Folgen ihrer Entscheidungen sowie ihres Handlungswillens beeinflusst. Letzterer ist nicht nur von den Bemühungen und Zielen abhängig, die für die Veränderung erforderlich sind, sondern auch von kognitiven und gesellschaftlichen Faktoren sowie der Bereitschaft.

4.4 Machbarkeit von CO₂-Zertifikaten als Anreiz für humusfördernde Bewirtschaftungsmassnahmen

Der Nachweis einer Kohlenstoffsequestrierung in Böden wäre grundsätzlich machbar. Wie im Fachbericht³ aufgezeigt wurde, ist dieser jedoch mit einem erheblichen logistischen und analytischen Aufwand verbunden. Zur quantitativen Bestimmung des Kohlenstoffvorrates sind drei Schritte nötig: möglichst repräsentative Beprobung der Fläche, analytische Messung des organischen Kohlenstoffes und Berechnung des Kohlenstoffvorrates. Um die Veränderungen des Kohlenstoffvorrates zweifelsfrei zu erfassen, müssen diese drei Schritte mehrfach wiederholt werden. Eine statistisch signifikante Zunahme des Kohlenstoffvorrates ist erst nach mehreren Jahren messbar. Die zuverlässige Quantifizierung einer Kohlenstoffsequestrierung ist entsprechend teuer. Ausserdem muss die Zunahme des Kohlenstoffvorrates mit einer Kontrollfläche verglichen werden, um den managementbedingten Anstieg gegenüber natürlichen, meist witterungsbedingten Schwankungen abgrenzen zu können. Da Änderungen im Kohlenstoffvorrat von den Standortverhältnissen und dem Kohlenstoffausgangsniveau abhängen, können die Ergebnisse zudem nicht auf andere Standorte übertragen oder verallgemeinert werden. Die Kosten für den Nachweis der Kohlenstoffsequestrierung fallen deshalb für jedes einzelne CO₂ Kompensationsprojekt an.

Die hohen Kosten für den Nachweis der Kohlenstoffsequestrierung können den wirtschaftlichen Anreiz für eine CO₂-Zertifizierung von Bodensenkenprojekten beträchtlich einschränken. Je mehr eigenständige Projektflächen es für die CO₂-Kompensation gibt und je kleiner und vielfältiger diese sind, desto höher fallen die Kosten aus. Die erstmalige Erfolgskontrolle ist erst nach einem Zeitraum von mehreren Jahren aussichtsreich, jede weitere messbare Erhöhung des Kohlenstoffvorrats benötigt ebenso lange. Ausserdem muss die Kohlenstoffbindung im Boden mindestens 30 Jahre lang gewährleistet sein, um als Kompensationsmassnahme zugelassen zu werden.

Wird der Aufbau von Bodenkohlenstoff für die Eins-zu-eins Kompensation von real erfolgten Emissionen genutzt, ist eine Quantifizierung der Senkenleistung unabdingbar. Dabei besteht ein Zielkonflikt zwischen der geforderten Genauigkeit der Messdaten und den Kosten für ihre Erhebung. Mindestanforderungen für Messung, Berichterstattung und Qualitätskontrolle sind zentral, um den Nachweis einer Klimaschutzwirkung der Kompensationsprojekte zu erbringen. Die gemessenen SOC-Vorratsänderungen sind gegenüber mehreren Kriterien zu bewerten: Permanenz, Additionalität, der Berücksichtigung der Systemgrenzen und von Zielkonflikten sowie der Fairness⁵⁶. Projekte zur Erhöhung der Senkenleistung unterliegen zudem den Anforderungen gemäss Artikel 5 der CO₂ Verordnung⁴⁸. CO₂-Zertifikate, welche für Kompensationsprojekte ausgestellt werden, sind somit **ein mögliches, aber in der Umsetzung sehr herausforderndes Instrument** zur Förderung der Kohlenstoffsequestrierung im Boden.

⁵⁶ Leifeld, J (2019) Kriterien für die Zertifizierung von Kohlenstoffsinken in Landwirtschaftsböden. Agrarforschung Schweiz 10
Wiesmeier, M. et al. (2020) CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Massnahmen und Grenzen. BonaRES Series 2020/1. BonaRes-Zentrum für Bodenforschung. c/o Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Halle. <https://doi.org/10.20387/BonaRes-F8T8-XZ4H>
Paul, C. et al. (2023) Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? Journal of Environmental Management 330: 117142.

Die langfristige Klimastrategie der Schweiz zeigt, dass die Schweiz ihre Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 im Vergleich zu 1990 um rund 90 Prozent vermindern kann⁵. Etwa 7 Mt CO₂-eq an schwer vermeidbaren Emissionen (vor allem aus der Tierhaltung und aus industriellen Prozessen) sind jährlich durch NET auszugleichen, um das angestrebte Netto-Null-Emissionsziel zu erreichen. Zum Portfolio der hierfür benötigten NET ist die Bodenbewirtschaftung dazuzuzählen. Das Sequestrierungspotenzial in landwirtschaftlich genutzten Böden ist jedoch begrenzt: Jede eingelagerte Tonne Kohlenstoff, die zur Kompensation von Emissionen im Verkehrssektor (d.h. im heutigen CO₂-Kompensationsregime) verwendet wird, fehlt zur Schaffung von Negativemissionen. Vor diesem Hintergrund erscheint die Durchführung von Bodenprojekten, mit denen im Sinne der langfristigen Klimastrategie vermeidbare Emissionen ausgeglichen werden, wenig sinnvoll. Die zeitliche Fixierung der Klimastrategie auf das Jahr 2050 darf nicht die Sicht darauf verstellen, dass Negativemissionen bereits heute von Bedeutung sind. Je frühzeitiger Kohlenstoff der Atmosphäre entzogen wird, desto grösser ist der Beitrag zur Erreichung der Klimaziele des Übereinkommens von Paris.

Die meisten der oben beschriebenen Herausforderungen bei der Umsetzung von Kompensationsprojekten zur Förderung der Kohlenstoffsequestrierung in Böden lassen sich mit Instrumenten der Agrarpolitik umgehen. Diese – beispielsweise Direktzahlungen für Bewirtschaftungsweisen zur Förderung der Bodenqualität oder Bodenfruchtbarkeitsfonds – würden ebenso einen Aufbau der SOC-Vorräte mit sich bringen, ohne die Notwendigkeit einer exakten Quantifizierung und ohne das enge Zeitkorsett des heutigen Kompensationsregimes mit seinen häufigen Berichterstattungspflichten. Eine langfristige Speicherung (Permanenz) der aufgebauten SOC-Vorräte würde auch mit der Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit als Voraussetzung für eine nachhaltige Bewirtschaftung als Hauptmotivation erreicht. Die Umsetzung solcher Massnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen würde eine auf das Netto-Null-Ziel 2050 ausgelegte Klimapolitik unter dem Übereinkommen von Paris unterstützen: In Zukunft dürfte die Kombination von neuen Fernerkundungsdaten mit spektroskopischen (Infrarot) Methoden und Modellierungsansätzen zwar ein grossflächiges und relativ preisgünstiges Monitoring der SOC-Vorräte ermöglichen, dennoch wäre dies für die Quantifizierung von Kompensationsprojekten zu ungenau. Auf landesweiter Ebene dürften diese Daten im Rahmen der nationalen Klimaberichterstattung (Treibhausgasinventar) jedoch in hinreichender Genauigkeit vorliegen, um – unter Einhaltung der internationalen Richtlinien – als Negativemissionen zur Annäherung an das Netto-Null-Ziel angerechnet und auf diese Weise auch klimapolitisch «in Wert gesetzt» werden zu können.

4.5 Fazit

Die nationale Gesetzgebung in den Bereichen Landwirtschaft, Wald und Raumplanung enthält keine Bestimmungen zur verstärkten Erhaltung des SOC oder zur Förderung der Kohlenstoffsequestrierung in Böden. Sie umfasst aber auch keine Instrumente, die einen direkten gegenteiligen Effekt hätten – mit der erwähnenswerten Ausnahme der Entwässerung von landwirtschaftlich genutzten organischen Böden.⁵⁰ Seit der Revision der CO₂-Verordnung⁴⁸, die im Juni 2022 in Kraft trat, ist die Kohlenstoffbindung im Boden als Kompensationsmassnahme zulässig, sofern die Permanenz der Speicherung für mindestens 30 Jahre sichergestellt ist. Es wurden zwar einige informelle Märkte identifiziert, die auf einer freiwilligen Teilnahme der Landwirtinnen und Landwirte beruhen, jedoch machen die Betriebe, die Massnahmen zur Kohlenstoffsequestrierung im Boden anwenden, auf nationaler Ebene nur eine sehr kleine Fläche aus.

Die Methoden zur Bestimmung des SOC-Vorrats sind etabliert, der sichere Nachweis von Vorratsänderungen an einem Standort bedingt jedoch einen hohen Aufwand. **Wegen den damit verbundenen hohen Kosten, der langen Projektlaufzeiten und den generellen Anforderungen an Kompensationsprojekte sind CO₂-Zertifikate zwar ein mögliches, aber äusserst herausforderndes Instrument zur Förderung der Kohlenstoffsequestrierung im Boden.**

Agrarpolitische Instrumente zur Steigerung und Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit könnten eine sinnvolle Alternative zum CO₂-Kompensationsmechanismus darstellen. Für den Agrarsektor wäre ein hybrider finanzieller Anreizmechanismus denkbar, der die Landwirtinnen und Landwirte teils für das Anwenden der Praktiken und teils für die erzielte Leistung entlohnt. Ausserdem wären bei einem solchen Me-

chanismus flankierende Massnahmen (Ausbildung und Information) notwendig und es müsste berücksichtigt werden, dass die Sequestrierungsfunktion des Bodens zeitlich begrenzt ist: Wenn die Senke voll ist, kann sie nicht weiterverwendet werden. Auch wenn es ähnliche Instrumente⁵⁷ gibt, sind sowohl die Konzeption als auch die Umsetzung eines solchen hybriden Mechanismus grundsätzlich anspruchsvoll, insbesondere für Landwirtinnen und Landwirte.

5 Ziel: eine integrale Politik für organische Bodensubstanz

Das Nationale Forschungsprogramm «Nachhaltige Nutzung der Ressource Boden» (NFP 68) hat zwischen 2012 und 2018 Grundlagen für eine nachhaltige Nutzung des Bodens in der Schweiz erarbeitet. In der Synthese des NFP 68 wurde die OBS als Schlüsselgrösse für die Bodenqualität und die Multifunktionalität des Bodens identifiziert.⁵⁸ Für die Eindämmung des Klimawandels oder die Anpassung an ihn sind Anstrengungen aus allen Sektoren erforderlich, wobei die Bewirtschaftung des Bodens und des organischen Kohlenstoffs eine zentrale Rolle spielt. In der Landwirtschaft müssen die Emissionen im Zusammenhang mit der Nahrungsmittel- und Faserproduktion deutlich reduziert werden. Ausserdem gilt es, dem derzeitigen tendenziellen Verlust von landwirtschaftlich genutzten Böden und anderen Kohlenstoffspeichern auf Ackerflächen entgegenzuwirken.⁵⁹ **Die für die nachhaltige Bewirtschaftung der OBS besonders wichtigen Ziele und strategischen Stossrichtungen der Bodenstrategie Schweiz⁹ werden in den in Kapitel 6 beschriebenen möglichen Massnahmen konkretisiert.** Basierend auf dem Wirkungspotenzial der Massnahmen in diesem Bereich wurden zwei Prioritäten identifiziert: die organische Substanz in landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden erhalten und erhöhen sowie den Verlust organischer Substanz in organischen Böden verhindern (Abb. 7).

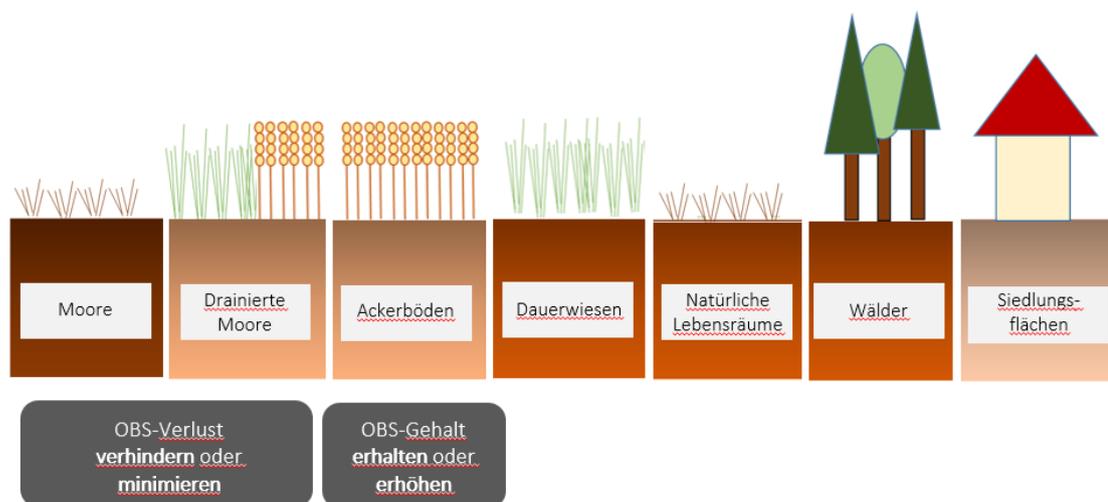


Abbildung 7: Prioritäten für die Bewirtschaftung landwirtschaftlich genutzter Böden.

Die Erhaltung oder Erhöhung des organischen Kohlenstoffs in mineralischen Böden (Gehalt oder Vorrat) **wirkt sich direkt positiv** auf die Qualität der Böden und der Ökosysteme aus und bringt **weitere Vorteile** für die Biodiversität, die Klimaregulierung (Minderung und Anpassung), die Nahrungsmittel-, Holz- und Faserproduktion sowie den Umgang mit Naturgefahren mit sich (Tabelle 5). Bisher wurden keine negativen Auswirkungen oder Interessenkonflikte mit Massnahmen zur Erhöhung des Gehalts (oder Vorrats) an organischem Kohlenstoff in mineralischen Böden festgestellt.

⁵⁷ Siehe z. B. Artikel 59 und Anhang 4 DZV: Die botanische Qualität nach Artikel 59 wird anhand von Indikatorpflanzen erhoben. Diese weisen auf einen nährstoffarmen Boden und artenreichen Bestand hin und müssen regelmässig vorkommen.

⁵⁸ [NFP 68 GS-DE.pdf \(nfp68.ch\)](#)

⁵⁹ [Commission sets the carbon farming initiative in motion | Climate Action \(europa.eu\)](#)

Die Erhaltung des Torfs in organischen, natürlichen oder landwirtschaftlich genutzten Böden ist ebenfalls eine Priorität. Der anhaltende SOC-Verlust bedeutet eine Beeinträchtigung oder im Extremfall das Verschwinden von Moorbiotoplandschaften, mit verheerenden Folgen für die Biodiversität und den Klimawandel. Der Verlust organischer Substanz in drainierten Torfböden wirkt sich zusätzlich auf die Landwirtschaft aus, da die Produktionskapazität sinkt und der Fortbestand der aktuellen landwirtschaftlichen Praxis gefährdet wird.

Tabelle 5: Weitere Vorteile einer integralen Bewirtschaftung der OBS in den verschiedenen Sektoren.

Sektor	Weitere Vorteile	Beispiele
Klimaregulierung	Eindämmung des Klimawandels durch CO ₂ -Sequestrierung Anpassung an den Klimawandel	Begrenzung der THG-Emissionen aus dem Boden Kompensation der THG-Emissionen Reduktion von städtischen Hitzeinseln
Biodiversität	Erhaltung und/oder Stärkung der genetischen Biodiversität sowie der Arten- und Ökosystemvielfalt	Erhaltung und/oder Verbesserung der funktionellen Biodiversität der Böden Erhaltung der Moorlandschaften
Forstwirtschaftliche Produktion	Erhaltung der Waldfunktionen	Erhaltung der Biodiversität im Wald (ober- und unterirdisch)
Produktion (Nahrungsmittel, Fasern, Energie)	Nachhaltige Produktion Widerstandskraft gegenüber dem Klimawandel	Erhaltung der Bodenstrukturqualität: - Erhöhte Wasseraufnahme - Verringerung der Erosion - Resistenz gegen Verdichtung
Naturgefahren	Eindämmung der Überschwemmungsgefahr Minderung des Erdbebenrisikos	Wasserversickerung in durchlässigen Böden Bessere Bodenstabilität

Eine integrale Bewirtschaftung der OBS im Hinblick auf Bodenschutz, Klimapolitik, Schutz der Biodiversität und der Biotope, nachhaltige Forst- und Landwirtschaft sowie Lebensmittelsicherheit setzt eine umfassende Überprüfung der derzeitigen Sektoralpolitiken sowie der gesetzlichen Instrumente voraus. Diese wirken sich direkt oder indirekt auf die Erhaltung oder Erhöhung des SOC aus (Abb. 8) oder können im Gegenteil negative Anreize schaffen.

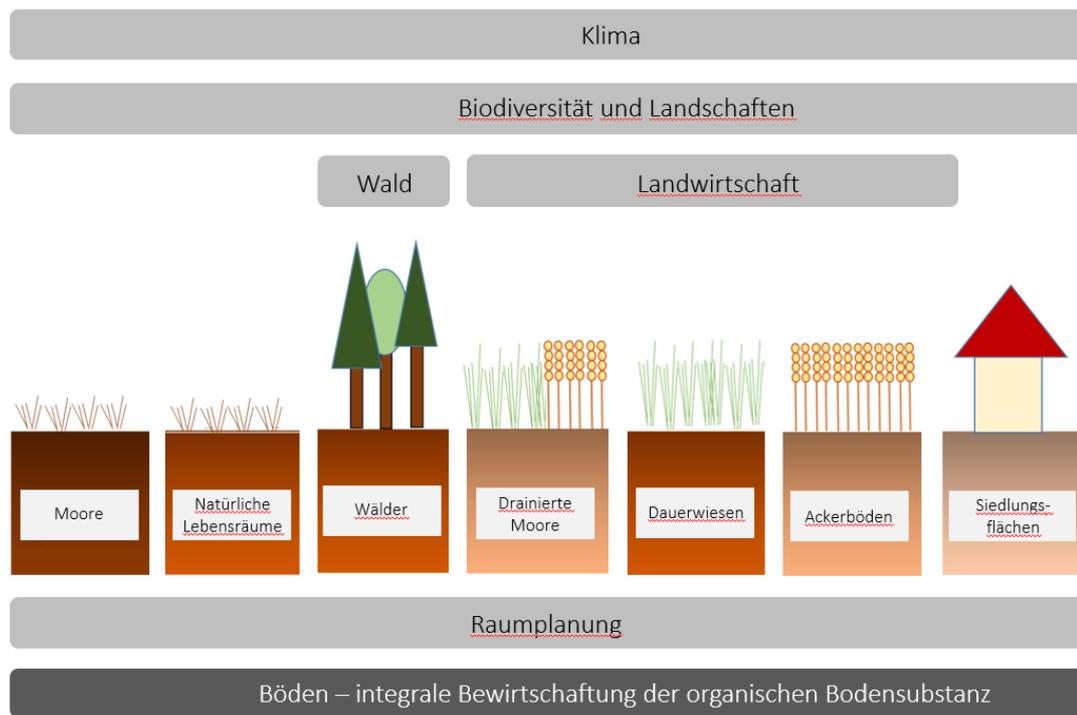


Abbildung 8: Integrale Bewirtschaftung der OBS in den Sektorpolitiken.

6 Mögliche Massnahmen für eine nachhaltige Bewirtschaftung der organischen Bodensubstanz

6.1 Optimierung der Bewirtschaftung von organischen und landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden

Massnahme 1

Wissenserwerb und Erarbeitung einer Entscheidungshilfe für die zukünftige Nutzung von landwirtschaftlich genutzten organischen Böden, unter Berücksichtigung der Aspekte Produktion, Biodiversität, Klima, Wasserqualität und Hochwasserschutz.

Die Wiederherstellung natürlicher organischer Böden (Hoch- und Flachmoore) und die Wiedervernäsung von landwirtschaftlich genutzten organischen Böden können einen wichtigen Beitrag zur Eindämmung des Klimawandels leisten, weil dadurch Emissionen aus der Mineralisierung von Torf verhindert oder minimiert werden und der verbleibende Kohlenstoff erhalten bleibt. Um dem Rückgang des OBS-Vorrats entgegenzuwirken und/oder THG-Emissionen zu verhindern, wurden in den wichtigsten landwirtschaftlich genutzten Moorebenen der Schweiz verschiedene Massnahmen versuchsweise angewandt oder sind geplant. Dabei kommen sehr viele verschiedene Elemente zum Tragen: Mit einer Synthese der Massnahmen für organische Böden in der Schweiz, mit denen kurz- oder mittelfristig die landwirtschaftliche Produktion aufrechterhalten werden kann, und der Beurteilung der Auswirkungen dieser Massnahmen auf die Kohlenstoffspeicherung (Erhaltung von Torf) wird ein Instrument zur Wissensvermittlung für künftige Projekte geschaffen (siehe z. B. die Projekte Bodenverbesserung Seeland⁶⁰ oder Biodiversitätsförderung auf feuchten und nassen Ackerflächen⁶¹). Zudem legt das Ziel 6.G des Landschaftskonzepts Schweiz (LKS)⁶², das für die Behörden im Sinne von Artikel 13 RPG bindend ist, fest,

⁶⁰ [Ergebnisse BOVE – Pro Agricultura Seeland](#)

⁶¹ [Biodiversitätsförderung auf feuchten und nassen Ackerflächen \(admin.ch\)](#)

⁶² [Landschaftskonzept Schweiz \(admin.ch\)](#); vom Bundesrat am 27. Mai 2020 verabschiedet.

dass grundsätzlich keine grösseren Feuchtflächen neu entwässert werden. Die Wiedervernässung von Böden geringerer landwirtschaftlicher Produktionseignung oder mit hoher Bedeutung für die Arten- und Lebensraumvielfalt kann zugelassen werden. In der Regel ist die Erneuerung bestehender Drainagen auf Flächen beschränkt, die aufgrund ihrer Bodenqualität für die Ernährungssicherung im Vordergrund stehen. Im Rahmen der Konkretisierung der Strategie Nachhaltige Entwicklung 2030 (SNE 2030)⁶³ beinhaltet der Aktionsplan 2021–2023 die Aktualisierung der Klimastrategie für die Landwirtschaft⁶⁴. Diese wird gegenwärtig vom BLW in Zusammenarbeit mit dem BAFU und dem ARE ausgearbeitet und sieht die Umsetzung der Massnahme 1 (Wissenserwerb und Erarbeitung einer Entscheidungshilfe für die Bewirtschaftung organischer Böden) vor.

Massnahme 2

Erarbeitung von Entscheidungshilfen für Landwirtinnen und Landwirte zur optimalen Humusbewirtschaftung (Erhaltung und Erhöhung des Bodenkohlenstoffs) in landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden und Gestaltung spezifischer Beratungsangebote für Betriebe.

Die Massnahmen zur Erhaltung und Erhöhung des SOC in landwirtschaftlich genutzten mineralischen Böden richten sich nach dem komplexen Zusammenspiel von Bodeneigenschaften, klimatischen Bedingungen, landwirtschaftlichen Praktiken auf Parzellenebene und dem Managementsystem der Betriebe. Soziale Faktoren erweisen sich ebenfalls als entscheidend, und Studien zeigen, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Praxis eingeführt wird, umso höher ist, wenn die betreffende Praxis bereits von anderen Landwirtinnen und Landwirten in der Region angewandt wird. Bei der Entwicklung ihrer Praktiken ist es von zentraler Bedeutung, dass die Landwirtinnen und Landwirte mittels flankierender Massnahmen beraten werden. Mit einer Auswertung von Pilotprojekten, die bereits in verschiedenen Kantonen durchgeführt wurden, wie zum Beispiel die Projekte «Humus» (SO), «Terres vivantes» (JU) oder «Projet Sol» (VD), sollen die ausschlaggebenden Punkte identifiziert werden, die für Empfehlungen hinsichtlich Praktiken zur Erhöhung des SOC-Gehalts in mineralischen Böden zu berücksichtigen sind. Das BLW plant die Umsetzung der Massnahme 2 (Konzept für die Beratung zur Humusbewirtschaftung auf der Grundlage von ÖLN-Bodendaten) im Rahmen der SNE 2030.

6.2 Bewertung und Anpassung der gesetzlichen Instrumente

Massnahme 3

Revision der Verordnung über Belastungen des Bodens zur rechtlichen Verankerung der Erhaltung und der Erhöhung der OBS und Festlegung von Referenzwerten für die OBS in mineralischen Landwirtschaftsböden.

Die Verordnung über Belastungen des Bodens⁶⁵ (VBBo) definiert, wann ein Boden als fruchtbar gilt (Art. 2 Abs. 1). OBS wird in der VBBo hingegen nicht explizit erwähnt; die Umsetzung von Massnahmen zur Erhaltung und Erhöhung der OBS ist daher nicht gesetzlich verankert. In Anbetracht ihrer Wichtigkeit für die Bodenfruchtbarkeit und -qualität sollte jedoch geprüft werden, wie die Erhaltung und Erhöhung der OBS in der Gesetzgebung festgeschrieben werden könnte. Die VBBo enthält bisher keine Angaben zu standorttypischen OBS-Gehalten oder einer unteren Gehaltsgrenze, bei der die Funktionalität des Bodens gefährdet ist. Die Arbeiten zu diesem Thema wurden bereits aufgenommen.⁶⁶

Dies geschieht im Rahmen der Schritte zur Umsetzung der Bodenstrategie Schweiz⁹, insbesondere im Handlungsfeld «Vollzug und Gesetzgebung». Die Bodenstrategie sieht eine Überprüfung der bestehenden Regelungen vor, einschliesslich der Gesetzgebung im Agrarbereich, um sie auf Überschneidungen, Widersprüche sowie Zielkonflikte zu durchleuchten. Ausserdem wird empfohlen, Verbesserungsvorschläge auszuarbeiten, damit ein kohärentes Regelwerk zustande kommt. Unter der Federführung des

⁶³ [Strategie Nachhaltige Entwicklung \(admin.ch\)](#)

⁶⁴ [Klimastrategie für die Landwirtschaft \(admin.ch\)](#)

⁶⁵ SR 814.12

⁶⁶ [Fachgruppe Vollzug Bodenbiologie \(admin.ch\)](#) VBBio-Humusreferenzwert für Ackerböden.

BAFU wurde die Festlegung von Referenzwerten für OBS in mineralischen Landwirtschaftsböden in die Klimastrategie für die Landwirtschaft aufgenommen, die derzeit aktualisiert wird⁶⁴.

6.3 Sensibilisierung und Weiterentwicklung des Wissensstands

Massnahme 4

Erarbeitung, in Zusammenarbeit mit Partnern, von gezielten Informationsmassnahmen in Bezug auf die Potenziale, Vorteile und Grenzen einer CO₂-Sequestrierung im Boden und Sensibilisierung für diese Herausforderungen im Rahmen der Weiterbildung für Fachleute.

Eine in Forschung und Praxis häufig geäusserte Herausforderung ist die mangelnde Wahrnehmung der Bedeutung und Empfindlichkeit der Böden, weshalb die Sensibilisierung eines der drei Handlungsfelder der Bodenstrategie Schweiz⁹ ist. Das Verhalten der Akteure, die Einfluss auf den Zustand und die Qualität des Bodens haben (Verwaltung, Landwirtschaft, städtische Dienste und Parks, Privatpersonen etc.), wird sowohl durch das Bewusstsein (Kenntnis der ökologischen Folgen, Relevanz der Themen in Bezug auf die Folgen und Anwendungskennnisse) als auch durch den Willen (psychologisch: Aufwand, Anreiz, Selbstbild, Bedürfnisse; sozial: Verhalten der anderen, Erwartungen der anderen an die Zielgruppe, Netzwerk; monetär: finanzielle Konsequenzen des Verhaltens) beeinflusst. Um eine Verhaltensänderung zu erreichen, müssen die verschiedenen Akteure den Wert des Bodens kennen, wissen, wie man ihn erhält, und auf der Grundlage dieses Wissens handeln. Da die Ressource Boden nach wie vor kaum bekannt ist, ist es die organische Substanz als eine der Komponenten noch viel weniger. Eine Sensibilisierung für die Erfordernisse und Mittel zur Erhaltung oder Konservierung des SOC bietet die Möglichkeit, unter den aktuellen Umständen, die von Öko-Angst aufgrund extremer Klimaereignisse geprägt sind, auf positive Weise zu kommunizieren. Ausserdem kann dadurch das Kommunikationsdefizit in Bezug auf Böden im Vergleich zu anderen Umweltbereichen behoben werden. Im Rahmen der Umsetzung der Bodenstrategie Schweiz hat das BAFU bereits eine Zusammenarbeit bezüglich Kommunikation mit verschiedenen Verbänden, Institutionen und Ämtern auf Bundes- und Kantonsebene initiiert und wird gemeinsame Aktionen ausarbeiten.

Die Kommunikation sollte auf das Potenzial und die Vorteile der Erhaltung oder Erhöhung des SOC ausgerichtet sein. Ferner ist es wichtig, auf die Schwierigkeiten einer Zertifizierung der CO₂-Sequestrierung im Boden hinzuweisen und zu betonen, dass der Aufwand, die Kosten und die Zeit, die für einen zuverlässigen Nachweis der Kohlenstoffsequestrierung im Boden erforderlich sind, eine grosse Herausforderung im Rahmen des derzeitigen Systems der CO₂-Kompensation darstellen. Unabhängig von der Zertifizierung hat die CO₂-Sequestrierung im Boden unbestreitbare Vorteile für die Gesamtfunktion des Bodens.

Massnahme 5

Unterstützung und Durchführung langfristiger Studien zu den Auswirkungen von Pflanzkohle und Verzicht auf die Förderung ihres Einsatzes in Böden, bis die positiven und negativen Auswirkungen der irreversiblen Einbringung von Pflanzkohle in den Boden bewertet wurden.

In den letzten Jahren wurde das Einbringen von Pflanzkohle als NET-Massnahme für eine langfristige CO₂-Sequestrierung in Böden empfohlen, die gleichzeitig die Bodenqualität und die landwirtschaftlichen Erträge verbessert. Bisher wurde jedoch kein ertragssteigernder Effekt auf die landwirtschaftlich genutzten Böden der Schweiz nachgewiesen, was hauptsächlich daran liegt, dass diese Böden bereits ein gutes Potenzial für die landwirtschaftliche Produktion aufweisen. Stattdessen gibt es mögliche Risiken, die beim derzeitigen Wissensstand noch schwer einzuordnen und zu bewerten sind: Einflüsse auf physikalische, chemische und biologische Eigenschaften, negative Auswirkungen auf die Zusammensetzung und Aktivität von Bodenorganismen, Änderung der Albedo und damit des Wärmehaushalts sowie eine verminderte Wirksamkeit von Pflanzenschutzmitteln. Um alle Chancen und Risiken der irreversiblen Einbringung von Pflanzkohle in Böden zu bewerten, sind längerfristige Studien erforderlich, insbesondere unter den spezifischen Bedingungen in der Schweiz. Die Durchführung von Langzeitstudien zu Pflanzkohle wurde in die Klimastrategie für die Landwirtschaft aufgenommen, die derzeit in Zusammenarbeit zwischen dem BLW und dem BAFU aktualisiert wird⁶⁴.

7 Anhang (Liste der Fachberichte)

Keel, S. G., Johannes, A., Boivin, P., Burgos, S., Charles, R., Hagedorn, F., Kulli, B., Leifeld, J., Saluz, A. & Zimmermann, S. (2021) *Soil carbon sequestration in Switzerland: analysis of potentials and measures (Postulate Bourgeois 19.3639)*. Report by Agroscope. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Bern.

Baranzini, A., Maradan, D. & Blockley, J. (2021), *Aspects économiques de la séquestration du carbone dans les sols (Postulat Bourgeois 19.3639)*. Report by HEG. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Bern.

Fliessbach, A., Tresch, S. & Steffens, M. (2021) *Review on the techniques and requirements for monitoring stock changes of soil organic carbon (Postulate Bourgeois 19.3639)*. Report by FiBL. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Bern.