

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	CASAS
Langtitel:	Carbon Sequestration in Austrian Soils
Zitiervorschlag:	Spiegel Heide, Jandl Robert, Foldal Cecilie, Bohner Andreas, Meyer Ina, Sinabell Franz, Streicher, Gerhard, Huber Sigbert, Birli Barbara, Tulipan Monika, Diaz-Pines Eugenio, Miloczki Julia, Sandén Taru, Fohrafellner Julia, Zechmeister-Boltenstern Sophie (2023). Carbon Sequestration in Austrian Soils (CASAS), Endbericht.
Programm inkl. Jahr:	ACRP11 - 2019
Dauer:	01.09.2019 bis 31.12.2022
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Priv.-Doz. Dr. Heide Spiegel
Kontaktperson Name:	Heide Spiegel
Kontaktperson Adresse:	1220 Wien, Spargelfeldstraße 191
Kontaktperson Telefon:	050555/34121
Kontaktperson E-Mail:	adelheid.spiegel@ages.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Bundesforschungszentrum für Wald (BFW), Wien Höhere Bundeslehr- und Forschungsanstalt für Landwirtschaft, HBLFA Raumberg-Gumpenstein Umweltbundesamt, Wien Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung (WIFO), Wien Universität für Bodenkultur (BOKU), Institut für Bodenforschung, Department für Wald- und Bodenwissenschaften, Wien

Allgemeines zum Projekt	
Schlagwörter:	Organischer Bodenkohlenstoff, Bodenbewirtschaftung, Klimawandel, ökonomische Auswirkungen, SDG
Projektgesamtkosten:	336.287,00 €
Förderungssumme:	249.996,00 €
Klimafonds-Nr:	B960219, ACRP11 - CASAS - KR18AC0K14633
Erstellt am:	29.03.2024

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

(max. 2 Seiten, Sprache Deutsch)

Die Erhöhung von Humus und damit des organischen Kohlenstoffs im Boden (SOC) wird als eine Maßnahme zur Reduzierung der atmosphärischen CO₂-Konzentration diskutiert. Die internationale „4 per 1000“ Initiative strebt eine Erhöhung des SOC um 0,4% pro Jahr an. Mit Hilfe von Literaturrecherchen wurde eine Übersicht gewonnen, ob und welche Maßnahmen der Land- und Bodenbewirtschaftung zu einer Erhöhung des SOC beitragen. Im Ackerbau sind dies z.B. unterschiedliche organische Düngung, Reduzierung der Bodenbearbeitung und ganzjährige Bodenbedeckung, die ein zusätzliches C-Speicherpotenzial vor allem im Oberboden in den ersten Jahren der Anwendung aufweisen. Schwarzbrache führt zum erhöhten Abbau und Verlusten von SOC. Für Klima und Umwelt ist es wichtig, dass bei allen SOC verbessernden Bewirtschaftungsmaßnahmen mögliche erhöhte Emissionen von anderen Treibhausgasen (N₂O, CH₄) und andere N-Verluste berücksichtigt werden.

Limitierte Steigerungen der SOC-Vorräte sind in Ackerböden nur durch umfassende Bewirtschaftungsänderungen (wo noch nicht erfolgt) möglich. Dazu zählt die Etablierung einer Pflanzendecke über das gesamte Jahr. Die – begrenzte - Anwendung qualitativ hochwertiger Sekundärrohstoffdünger (z.B. Bio-Abfallkomposte und Biokohle) und eine weitere Reduktion der Bodenbearbeitung sowie die Etablierung von Hecken und der Schutz von Moorböden sind Maßnahmen, die für das 4 Promille Szenario bis 2030 herangezogen wurden. Diese Bewirtschaftungspraktiken müssen langfristig aufrechterhalten werden. Oberstes Ziel ist es, die Humusvorräte im Boden zumindest zu erhalten.

Dauergrünlandböden sind in Österreich aufgrund ihrer hohen Humusvorräte und beträchtlichen Flächengröße wichtige Speicher von organischem Kohlenstoff (C). Humusgehalt und Humusvorrat sind auf vergleichbaren Standorten deutlich höher als in Ackerböden. In österreichischen Dauergrünlandböden beträgt der Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff in 0-30 cm Bodentiefe im Durchschnitt 93 t C pro Hektar. Beträchtliche Mengen an organischem Kohlenstoff (> 40 %) werden im Unterboden (10-50 cm) gespeichert. Klima, Bodeneigenschaften (insbesondere Bodenwasserhaushalt), Vegetationstyp und Bewirtschaftungsintensität prägen den Humusvorrat von Dauergrünlandböden. Pflanzenwurzeln und kohlenstoffreiche organische Dünger (Mist, Stallmistkompost) sind die wichtigsten Ausgangssubstanzen für die Humusbildung. Im Dauergrünland ist die Bodenkohlenstoffsequestrierung bei mittlerer Bewirtschaftungsintensität (2-4 Nutzungen pro Jahr, jährliche entzugsorientierte Düngung mit Mist oder Stallmistkompost) am höchsten. Eine Humusanreicherung erfolgt in Dauergrünlandböden sehr langsam und ist nur bis zur Erreichung des höchstmöglichen lokalen Ertragspotenzials sinnvoll. Humuserhaltende Maßnahmen sowie

Maßnahmen zur Verbesserung der Humusqualität sind wichtiger als Maßnahmen zur Erhöhung des Humusvorrats im Boden. Bei der Umsetzung von humussteigernden Maßnahmen müssen Nebenwirkungen und zusätzliche positive Umweltwirkungen berücksichtigt werden. Eine Bodenkohlenstoffsequestrierung kann im Dauergrünland Zielkonflikte zwischen Klima- und Naturschutz auslösen.

Auch die Art der Waldbewirtschaftung beeinflusst den SOC. Zum Beispiel führten Nährstoffzugaben (N, P, K) und Kalkung zu einer Akkumulation der organischen Auflage und die NPK-Düngung allein tendierte dazu, die organische Auflage zu mobilisieren. In der Re-Evaluierung des BFW Langzeitversuchs unter Fichte „Hauersteig“ wurde festgestellt, dass die höchste Bestandesdichte den höchsten Gehalt an SOC im oberen Mineralboden aufweist, die niedrigste Pflanzendichte den niedrigsten. In tieferen Bodenschichten verschwinden die Unterschiede zwischen den Bewirtschaftungsarten. Im Wald ist die räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften hoch, daher ist ein beträchtlicher Aufwand in Bezug auf Probenanzahl und Bodenanalytik notwendig, um mögliche Unterschiede zwischen Behandlungen statistisch absichern zu können. Im Waldbodenmonitoring ergibt sich eine Balance zwischen Standorten, die innerhalb von 20 Jahren eine Quelle oder Senke von Kohlendioxid aus dem Abbau oder Aufbau von Kohlenstoffvorräten in Böden sind. Aus den Ergebnissen der Waldbodenuntersuchungen konnte nicht schlüssig abgeleitet werden, ob die Nichtbewirtschaftung der Wälder zur Erhöhung der Kohlenstoffvorräte führt, was eine Wissenslücke darstellt. Jede Veränderung des Boden-Kohlenstoffvorrates läuft langsam ab. Waldböden spielen daher für kurzfristige Ziele der Kohlenstoff-Festlegung nur eine geringe Rolle.

Für die ökonomische Folgenabschätzung eines "4-Promille"-Bodenmanagement-szenarios ist die Auswahl zusätzlicher Maßnahmen zur Verbesserung des Bodenkohlenstoffmanagements in der Acker-, Grünland- und Forstwirtschaft in Österreich von Bedeutung. Diese Maßnahmen werden in einem Nachhaltigkeitsszenario gebündelt, das räumlich und zeitlich in Bezug auf die vorgeschlagene Fläche und den Zeitpunkt der Umsetzung im Hinblick auf das Jahr 2030 quantifiziert wird. Aktuelle Schlussfolgerungen betreffen die Bewertung zusätzlicher, im ÖPUL-Programm noch nicht angewandter Maßnahmen, wie z.B. die zusätzliche Ausbringung von Kompost aus verbesserten abfallwirtschaftlichen Praktiken und die Erhaltung von Mooren zur kohlenstoffneutralen Bewirtschaftung der österreichischen Böden.

Wir analysierten die Auswirkungen der 4-Promille-Initiative auf ausgewählte Ziele für eine nachhaltige Entwicklung (SDGs) und meinen, dass eine erfolgreiche Umsetzung von 4-Promille-Strategien das Ranking Österreichs im SDG-Index verbessern könnte. Dazu wurden 2 neue quantitative Indikatoren vorgeschlagen, wobei ein Indikator die aktuellen SOC-Vorräte im Ackerland im Vergleich zur ursprünglichen Vegetation wiedergibt (zeigt die potenzielle Speicherung oder die Verluste) und der andere Indikator berücksichtigt Veränderungen im Laufe der Zeit als Auswirkung des Bodenmanagements. Diese Entwicklung könnte eine Wissenslücke bezüglich SOC Sequestrierung und SDG Indikatoren schließen.

2 Executive Summary

(max. 2 Seiten, Sprache Englisch)

Increasing humus and, thus, soil organic carbon (SOC) is discussed as a measure to reduce atmospheric CO₂ concentration. The international "4 per 1000" initiative aims to increase the SOC by 0.4% per year. Literature reviews were used to obtain an overview of whether and which agricultural and soil management measures contribute to an increase in SOC. In arable farming these are, for example, different organic fertilisation, reduction of tillage and year-round soil cover, which have an additional C storage potential especially in the topsoil in the first years of application. Bare fallow leads to increased degradation and losses of SOC. For climate and environment, it is important that all SOC-improving management measures take into account possible increased emissions of greenhouse gases (N₂O, CH₄) and other N losses. In the AGES long-term trials concerning crop residue management, we could not find correlations between SOC and soil parameters such as texture and pedogenic oxides. Compared to long-term crop residue removal, the incorporation resulted in significantly higher SOC storage down to depths of more than 60 cm in the Marchfeld. Further - limited - increases in SOC sequestration are only possible in arable soils through comprehensive management changes (where these have not yet taken place). These include the establishment of a plant cover over the entire year. The choice of crop varieties and root development must be given more attention in the future. The - limited - application of high-quality secondary raw material fertilisers (e.g. organic waste composts and biochar) and a further reduction in tillage as well as the establishment of hedgerows and the protection of peat soils are measures that were used for the 4-per-mille scenario by 2030. These management practices must be sustained in the long term. However, the ultimate goal is to at least maintain the humus stocks in the soil.

In Austria, permanent grassland soils are important reservoirs of organic carbon due to their high humus stocks and considerable area size. Humus content and humus stocks are significantly higher on comparable sites than in arable soils. In Austrian permanent grassland soils, the stock of soil organic carbon at 0-30 cm soil depth is on average 93 t C per hectare. Considerable amounts of organic carbon (> 40 %) are stored in the subsoil (10-50 cm). Subsoils have a great potential for long-term soil carbon sequestration. Climate, soil properties (especially soil water balance), vegetation type and management intensity shape the humus stock of permanent grassland soils. Plant roots and carbon-rich organic manures (dung, manure compost) are the most important initial substances for humus formation. In permanent grassland, soil carbon sequestration is highest at medium management intensity (2-4 uses per year, annual withdrawal-oriented fertilisation with manure or manure compost). Humus accumulation takes place very slowly in permanent grassland soils and only makes sense until the highest possible local yield potential is reached. Humus conservation measures as well as measures to improve humus quality are more important than measures to increase the humus stock in the soil. When

implementing humus-enhancing measures, side effects and additional positive environmental impacts must be taken into account. Soil carbon sequestration can trigger conflicts of interest between climate protection and nature conservation in permanent grassland.

The type of forest management also influences the SOC. For example, nutrient additions (N, P, K) and liming led to an accumulation of the organic layer, NPK fertilisation alone tended to mobilise the organic layer. In the re-evaluation of the BFW long-term trial under spruce "Hauersteig" it was found that the highest stand density had the highest content of SOC in the upper mineral soil, the lowest plant density the lowest. Towards deeper soil depths the differences between the treatments disappear. In a more recent trial, the differences are less accentuated. In forests, the spatial variability of soil properties is high, so a considerable effort in terms of sample number and soil analysis is necessary to be able to statistically validate possible differences between treatments. In the soil monitoring a balance was found between sites that are a source or sink of carbon dioxide from the decomposition or build-up of carbon stocks in soils within 20 years. Overall, the balance is slightly positive (i.e. a carbon sink); the effect is statistically not significant from zero. It was not possible to conclusively deduce from the results of the forest soil studies whether non-management of forests leads to an increase in carbon stocks, which is a gap in our knowledge. A key message is that any change in soil carbon stocks is slow. Forest soils therefore play only a minor role for short-term carbon sequestration targets.

For the economic impact assessment of a "4-per-mille" soil management scenario, the selection of additional measures to improve soil carbon management in arable, grassland and forestry in Austria is of importance. These measures are bundled in a sustainability scenario that is quantified spatially and temporally in terms of proposed area and timing of implementation with respect to the year 2030. Current conclusions concern the evaluation of additional measures not yet applied in the ÖPUL programme, such as the additional application of compost from improved waste management practices and the conservation of peatlands for carbon-neutral management of Austrian soils.

We analysed the impact of the 4-per-mille Initiative on selected Sustainable Development Goals (SDGs) and consider that a successful implementation of 4-per-mille strategies could improve Austria's ranking in the SDG Index. For this purpose, 2 quantitative indicators were proposed, one focusing on current SOC stocks in arable land compared to original vegetation (showing potential storage or losses) and the other considering changes over time as an impact of soil management. This development could fill a knowledge gap regarding SOC sequestration and SDG indicators.

3 Hintergrund und Zielsetzung

(max. 2 Seiten) Beschreibung von Ausgangslage, Aufgabenstellung und Zielsetzung.

Die Erhöhung der organischen Kohlenstoffvorräte im Boden wird als eine Maßnahme zur Verbesserung der Bodengesundheit, der Ernährungssicherheit sowie der Verringerung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre angesehen. Auf der COP 21 (Paris 2015) wurde die 4-Promille-Initiative ins Leben gerufen, bei der durch eine optimierte Bewirtschaftung von Ackerland, Grünland und Wäldern die organischen Kohlenstoffvorräte im Boden jährlich um 0,4 % erhöht werden sollen.

Das Projekt hat die 4-Promille-Initiative für die österreichischen Gegebenheiten kritisch betrachtet. Die wichtigsten Ziele waren:

- a. Evidenz zu finden für Bodenmanagementstrategien (Acker, Grünland, Wald), die den organischen Kohlenstoff im Boden nachhaltig erhöhen
- b. Die Beeinflussung der organischen Kohlenstoffvorräte im Boden durch die Bodenbewirtschaftung oder andere, z.B. sozio-ökonomische Einflussfaktoren zu untersuchen
- c. Die Erhebung der wirtschaftlichen Kosten und des Nutzens wirksamer Bodenbewirtschaftungsmaßnahmen in Form einer modellgestützten Szenarioanalyse und Überprüfung der damit verbundenen Nebeneffekte
- d. Die Wechselbeziehung zwischen der Anreicherung von organischem Kohlenstoff im Boden und den Zielen der nachhaltigen Entwicklung zu beleuchten
- e. Das Potenzial zur Bindung von organischem Kohlenstoff in bewirtschafteten Böden im Vergleich zu unbewirtschafteten Böden in Österreich zu bewerten.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

(max. 20 Seiten)

Darstellung des Projektes, der Ziele und der im Rahmen des Projektes durchgeführten Aktivitäten. Darstellung der wesentlichen Arbeitspakete und Aktivitäten. Präsentation der Projektergebnisse.

Die Erhöhung der organischen Bodensubstanz und damit des organischen Bodenkohlenstoffs (soil organic carbon, SOC) wird als eine wirksame Maßnahme zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit, zur Verbesserung verschiedener ökosystemarer Bodenfunktionen (Filter-, Puffer-, Transformatorfunktion, Wasser- und Nährstoffspeicherung, etc.) und als Beitrag zum Klimaschutz bzw. zur Anpassung an den Klimawandel angesehen. Vorrangiges Ziel des Projektes war eine Analyse, ob und wenn ja in welchem Ausmaß ausgewählte Bodenbewirtschaftungspraktiken in Österreich zu einer Erhöhung der SOC Vorräte geführt haben und welche Maßnahmen ergriffen werden können, um diese in einem vernünftigen Ausmaß zu erhöhen bzw. zu erhalten.

Acker - WP 2

In der Literatur werden im Ackerbau zahlreiche verschiedene Bodenbewirtschaftungsmaßnahmen genannt, die zur Erhaltung bzw. zu einer Steigerung des organischen Bodenkohlenstoffs führen können. Diese wurden zunächst in einer umfangreichen Literaturstudie evaluiert und die Ergebnisse in einer wissenschaftlichen Publikation veröffentlicht (siehe Tiefenbacher et al., 2021). Diese Literaturstudie ergab, dass zwei Strategien - Erhöhung der Kohlenstoffzufuhr (z. B. durch verstärkte Primärproduktion, organische Düngemittel) und die Verringerung von SOC-Verlusten (z. B. Verringerung der Bodenerosion, Steuerung der Bodenatmung durch Bodenbewirtschaftung) - das Potenzial zur Erhaltung bzw. Erhöhung der SOC Vorräte haben. Je nach Maßnahme können entweder bis zu 714 ± 404 (Kompost) kg C pro Hektar und Jahr gebunden werden, kein eindeutig nachweisbarer Einfluss erzielt (Mineraldüngung) oder sogar die SOC-Vorräte im Oberboden reduziert werden (Schwarzbrache). Insgesamt muss das Kohlenstoffbindungspotenzial des Unterbodens (>40 cm) weiter untersucht werden. Nebeneffekte (z.B. zusätzliche Treibhausgas-Emissionen und Stickstoff (N)-Verluste, z.B. bei der Erzeugung und Anwendung von Mineraldüngern und organischen Düngern) müssen für eine nachhaltige Klimawirksamkeit berücksichtigt werden. Zudem müssen SOC aufbauende Maßnahmen dauerhaft/über Jahrzehnte aufrechterhalten bleiben. Des Weiteren wird empfohlen, dass der Gesamtnutzen für die SOC-Sequestrierung durch eine Ökobilanz (life cycle analysis, LCA) unter den jeweiligen Boden- und Klimabedingungen überprüft werden sollte.

In AGES Feldversuchen werden seit Jahrzehnten optimierte (Humus schonende) Bewirtschaftungspraktiken untersucht. In den Feldversuchen Rutzendorf (seit 1982) und Grabenegg (seit 1986) wird das Belassen der Ernterückstände am Feld mit einer „Business as usual“ (BAU) Variante (Abfuhr der Ernterückstände) verglichen (Abbildung 1). Sie zeigt, dass die SOC Vorräte in Rutzendorf/Marchfeld – unabhängig von der Bewirtschaftung – fast doppelt so hoch sind wie in Grabenegg/Alpenvorland.

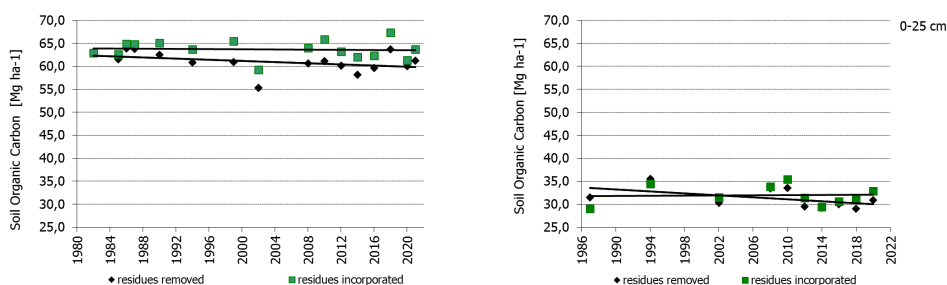


Abbildung 1: Organische Kohlenstoffvorräte im Boden (Mg ha⁻¹) in 0-25 cm unter jährlicher Abfuhr und Einarbeitung von Ernterückständen der AGES-Feldversuche in (links) Rutzendorf (Marchfeld) und (rechts) Grabenegg (Alpenvorland)

Es wird ersichtlich, dass die Einarbeitung von Ernterückständen auf beiden Standorten langfristig eine Aufrechterhaltung der Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff ermöglicht, während eine jährliche Abfuhr zu Abnahmen in den SOC-Vorräten führt. Aus den Abbildungen sind jährliche Schwankungen in den

SOC Vorräten erkennbar. Diese können auf Unterschiede in der Probennahme zurückgeführt werden, denn zum Teil sind die Streuungen innerhalb weniger Quadratmeter sehr hoch. Insbesondere auf Praxisflächen ist eine GPS gestützte Probennahme eine Möglichkeit diese räumlichen Schwankungen zu minimieren. Zudem sind auch Analysenstreuungen möglich. Eine zusätzliche Unsicherheit besteht darin, dass für die Angabe der SOC Vorräte die SOC Konzentrationen (Gehalte) mit der jeweiligen Bodendichte und der Tiefe umgerechnet werden müssen. Messungen der Bodendichte, insbesondere in größeren Bodentiefen, sind sehr aufwändig. Für die Berechnung der SOC Veränderungen bzw. Zunahmen („sequestration rates“) werden die Vorräte in einer bestimmten Bodentiefe zu Beginn der Untersuchungsperiode angegeben und die Veränderungen der SOC-Vorräte in $\text{Mg (t) C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ zwischen optimierter Bewirtschaftung und Kontrolle in einer bestimmten Periode berechnet (FAO, 2020; EJPSoil/CarboSeq). Eine positive Differenz der SOC Vorräte („SOC sequestration“) zwischen der BAU Bewirtschaftung (Abfuhr der Ernterückstände) und der optimierten Bewirtschaftung (Einarbeitung) ist auch möglich, wenn die Vorräte bei ersterer zurückgehen und bei letzterer lediglich aufrechterhalten bleiben. Das kann zu einer Diskrepanz in den Aussagen und Erwartungen hinsichtlich einer Erhöhung der SOC Vorräte durch ausgewählte Bewirtschaftungsänderungen führen.

Meistens werden in der Literatur nur Änderungen der SOC Vorräte des Oberbodens behandelt. Daher wurden im CASAS Projekt bei den Ernterückstandsversuchen Proben bis in 75 cm Bodentiefe entnommen (0-25, 25-50, 50-75 cm).

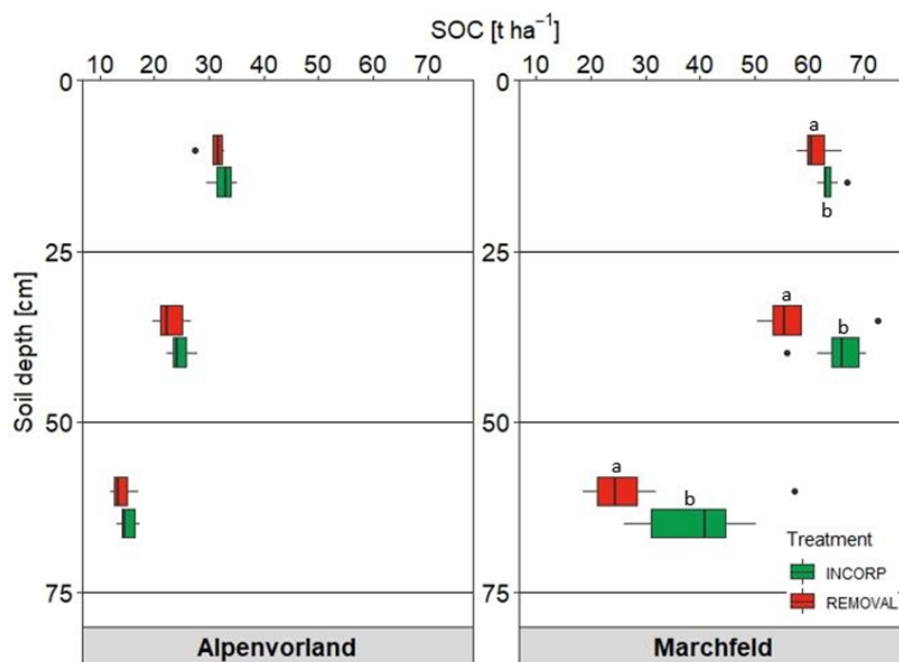


Abbildung 2: Vorräte an organischem Kohlenstoff (SOC) im Boden von INCORP: Einarbeitung von Ernterückständen, REMOVAL: Abfuhr von Ernterückständen, in 0-75 cm Bodentiefe in den Versuchen zu Ernterückständen in Grabenegg (Alpenvorland) und Rutzendorf (Marchfeld). Die Werte sind repräsentativ für die jeweilige 25 cm-Schicht, in der sie sich befinden. Unterschiedliche

Kleinbuchstaben weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Varianten INCORP und REMOVAL hin (Welch Two Sample t-t-test, $p < 0,05$).

Der kalkhaltige Tschernosem im Marchfeld weist über alle untersuchten Bodenschichten hinweg etwa doppelt so hohe SOC-Vorräte auf wie die vergleyte Braunerde im Alpenvorland. Abbildung 2 zeigt außerdem, dass die SOC-Vorräte im Marchfeld durch die langfristige Einarbeitung bzw. Beseitigung von Ernterückständen bis zu einer Tiefe von 75 cm beeinflusst werden. So waren die SOC Vorräte nach langjähriger Einarbeitung der Ernterückstände in allen Tiefenstufen gegenüber der Abfuhr signifikant höher, während die SOC Vorräte in einem gleyhaltigen Luvisol nach 34 Jahren nur geringe Unterschiede aufwiesen. Im Gegensatz dazu fanden Poeplau et al. (2015) eine signifikante SOC-Akkumulation durch Stroheinarbeitung nur für Standorte mit einem Tongehalt von über 30 %, jedoch erfüllt keiner der von uns untersuchten Oberböden dieses Kriterium. Es konnten in den AGES Feldversuchen keine statistisch signifikanten Korrelationen zwischen SOC und Bodenparametern wie Textur und pedogenen Oxiden festgestellt werden.

Dennoch werden mehr zeitliche Daten bis in tiefere Bodenschichten auf verschiedenen Standorten benötigt, um das weitere Potenzial der SOC-Akkumulation durch Einarbeitung der Ernterückstände zu quantifizieren. Dies wird besonders vor dem Hintergrund alternativer Verwendungsmöglichkeiten für Ernterückstände (z.B. Stroh für thermische Verwertung oder Rübenblatt für Biogas) notwendig. Da der Bedarf an Ernterückständen aufgrund der höheren Nachfrage nach Bioenergie voraussichtlich steigen wird, sind Abschätzungen notwendig, ob die Einarbeitung von Ernterückständen oder die Nutzung als Energiequelle einen positiveren Klimaeffekt hat.

Weiters wurden die relativen SOC-Vorrats-Änderungen und die SOC Sequestrierungsraten in Monitorings und in Feldversuchen in verschiedenen Bundesländern neu berechnet oder aus vorhandener Literatur zusammengestellt (Tabelle 4 in Appendix).

Ergebnisse Monitoring

In **Niederösterreich** zeigten Untersuchungen von Wenzel et al. (2022) zwischen 1990/92-2015/20 in 0-20 cm über verschiedenste Bodentypen hinweg eine durchschnittliche SOC Sequestrierung von $+200 \text{ kg C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$. Als Gründe dafür wurden das Verbot des Strohabbrennens sowie ÖPUL Maßnahmen wie reduzierte Bodenbearbeitung und verstärkter Anbau von Zwischenfrüchten genannt. Nach Dersch (2019) zeigten die Auswertungen von Bodenanalysenergebnissen und Berechnungen der SOC Vorräte in den obersten 20 cm in den NÖ Kleinproduktionsgebieten Marchfeld und Tullnerfeld eine SOC Sequestrierung von ca. 180 und $320 \text{ kg C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ zwischen den Perioden 1991/1995-2015/2017 (ca. 25 Jahre). Im **OÖ Produktionsgebiet** Traun-Ennsplatte war diese mit $180 \text{ kg ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$ etwas geringer. Hier waren allerdings die SOC Vorräte zu Beginn der Messungen am höchsten. Das deutet darauf hin, dass insbesondere bei höheren SOC Vorräten zu Beginn der Untersuchungsperiode das weitere

Sequestrierungspotenzial begrenzt(er) ist. In der **Steiermark** wurden Veränderungen der Kohlenstoffgehalte aus wiederholten Untersuchungen ausgewertet. In dem vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellten Datensatz wurden 53 Acker- und 55 Grünlandstandorte in 14 verschiedenen Bezirken analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass es kein klares Muster in der Entwicklung der SOC Gehalte gibt. Der gemessene Gehalt an SOC bleibt gleich (0) und/oder steigt bzw. sinkt im Laufe der Zeit in einem Bereich von etwa -3 % bis +2,5 % im Vergleich zur vorherigen Messung. In Abbildung 3 sind die Trends in den 14 Bezirken dargestellt, wobei jede Linie den SOC-Gehalt auf einem Acker- oder Grünlandstandort beschreibt.

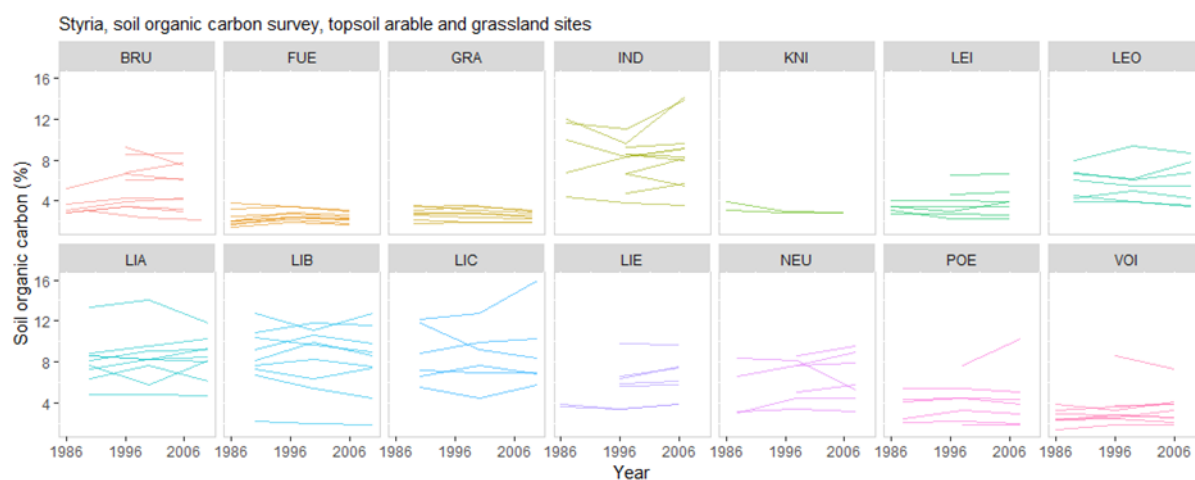


Abbildung 3: Gehalt an Bodenkohlenstoff in (%) von Steirischen Standorten (Acker und Grünland) entlang der Zeitachse von 1986 zu 2010 in allen 14 Bezirken.

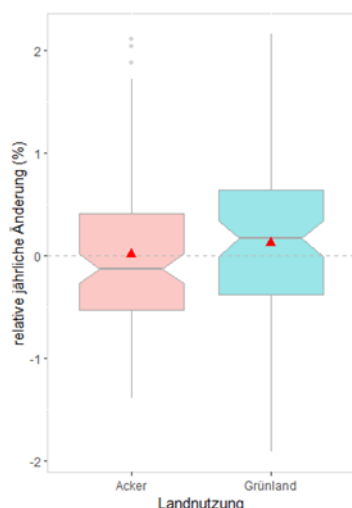


Abbildung 4: Relative Änderung des organischen Bodenkohlenstoff pro Jahr in Acker (rot) und Grünlandböden (blau) in der Steiermark. Die roten Dreiecke zeigen die Mittelwerte.

Tabelle 1: Mittlere relative Änderung in Bodenkohlenstoffgehalte pro Jahr in Acker und Grünlandböden (Oberboden) in der Steiermark.

Landnutzung	Mittlere Änderung von SOC per Jahr	
	(%)	(‰)
Acker	0.02	0.2

Wie in Abbildung 4 dargestellt, ist der SOC-Gehalt in Ackerböden homogener. Sowohl Acker- als auch Grünlandböden weisen einen mittleren Anstieg des SOC-Gehalts auf (Abbildung 4; Tabelle 1). Der Anstieg bei Grünlandböden ist größer, allerdings auch die Variabilität. Bei Ackerböden ist der Median negativ, was bedeutet, dass der SOC-Gehalt in der Steiermark auf der Mehrheit der Ackerflächen leicht abnimmt.

Ergebnisse aus Feldversuchen

Bodenbearbeitung

Klik und Rosner (2021) berichteten über unterschiedliche Entwicklungen der SOC Vorräte (0-30 cm) nach Änderung der Bodenbearbeitung an 3 Standorten in Niederösterreich. Am Standort Mistelbach wurden nach 19 Versuchsjahren Abnahmen der SOC Vorräte unter Minimalbodenbearbeitung und No Tillage im Vergleich zu konventioneller Pflugbearbeitung festgestellt, Zunahmen zwischen 68 und 1094 kg C ha⁻¹yr⁻¹ dagegen in Pixendorf und Pyhra. Am Marchfeld-Standort Raasdorf konnten mit No-Till und reduzierter Bodenbearbeitung und am Standort Fuchsenbigl mit reduzierter und Minimalbodenbearbeitung die SOC Vorräte angehoben werden.

Düngung: mineralisch und organisch (inklusive Einarbeitung von Ernterückständen)

Auf Standorten in Niederösterreich hat eine optimale mineralische N-Düngung verglichen mit einer unterlassenen N-Düngung nach Dersch und Böhm (2001) nach 36 Versuchsjahren zu einer SOC Sequestrierungsrate zwischen 17 und 106 kg C ha⁻¹yr⁻¹ geführt.

Die jährliche Einarbeitung von Ernterückständen führte nach mehr als 30 Jahren zu rechnerischen SOC Sequestrierungsrate von 58 und 63 kg C ha⁻¹yr⁻¹, diese sind niedriger als die früher ermittelten (Spiegel et al., 2014; Dersch und Böhm 2001). Dies bestätigt eine Abflachung der SOC Zunahmen mit fortschreitender Dauer der verbesserten Bodenbewirtschaftung („Gleichgewicht“).

Eine zusätzliche Stallmistdüngung von 10t ha⁻¹yr⁻¹ führte zu SOC Sequestrierungsrate von 160 und 376 kg C ha⁻¹yr⁻¹ (Dersch und Böhm, 2001). Auf Standorten in der Steiermark - Wagna und Kalsdorf - führte die N-Mineraldüngung verglichen mit einer N Nulldüngung zu Sequestrierungsrate von 325 und 240 kg C ha⁻¹yr⁻¹. Eine Kombination von Gülle- und N-Mineraldüngung hatte auf diesen Standorten eine SOC Erhöhung von 445 und 248 kg C ha⁻¹yr⁻¹ und reine Gülledüngung von 534 und 330 kg C ha⁻¹yr⁻¹ innerhalb von 15 und 11 Jahren zur Folge. Gülledüngung erhöhte die SOC Vorräte im Vergleich zur N-Mineraldüngung um 233 und 75 kg C ha⁻¹yr⁻¹.

Am Kompostversuch in OÖ wurden nach 27 Jahren SOC Sequestrierungsrate von 243 kg C ha⁻¹yr⁻¹ (mittlere Kompostdüngung) und 476 kg C ha⁻¹yr⁻¹ (hohe

Kompostdüngung) errechnet. Auch hier ist eine Abnahme der jährlichen Sequestrierungsraten mit zunehmender Versuchsdauer feststellbar.

Künstliche Bewässerung (Marchfeld) und Schwarzbrache (Tatzber et al., 2009; Dersch und Böhm, 2001) führten zu Abnahmen der SOC Vorräte.

Maßnahmen für ein Nachhaltigkeits(4-Promille)szenarium

Gemeinsam mit dem WIFO wurden zusätzliche Bewirtschaftungsmaßnahmen mit dem Ziel einer weiteren Erhöhung der SOC Vorräte vorgeschlagen. Da in Österreich nicht zu allen humusschonenden Bewirtschaftungsoptionen SOC Sequestrierungsdaten zur Verfügung standen, wurden weitere Potenziale zur SOC Steigerung aus Literaturdaten entnommen (Tiefenbacher et al., 2021). Die zusätzlichen Maßnahmen sind in Abbildung 5 ersichtlich. Sie entstammen dem GAP Strategieplan (2023), der Moorstrategie (BML, 2022) und enthalten die – begrenzte – Aufbringung organischer Materialien (Biokohle und Kompost aus Abfall).

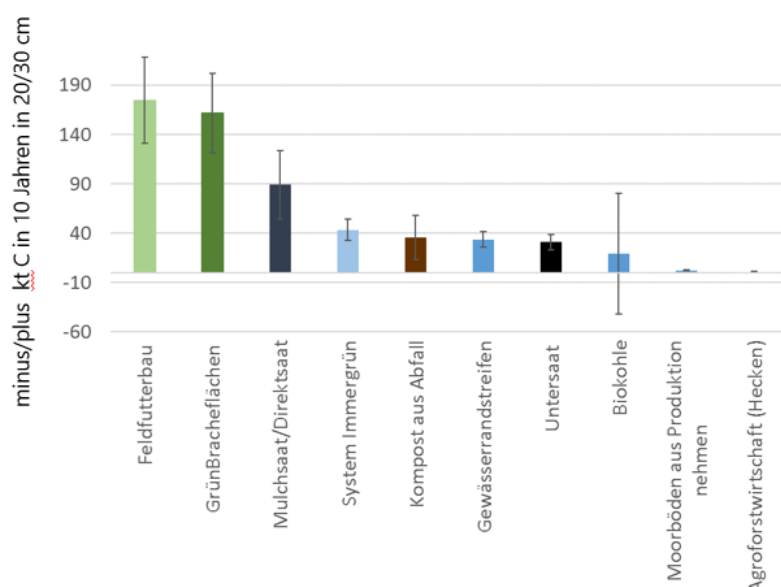


Abbildung 5: Errechnete SOC Zunahmen/Abnahmen (kt C in 10 Jahren) in 20/30 cm Boden durch Nachhaltigkeits-Maßnahmen im Ackerbau. Fehlerbalken zeigen die Standardabweichungen.

Die Berechnungen zeigen, dass mit den angegebenen Maßnahmen im Ackerbau pro Jahr ca. 17% des 4-Promille-Ziels erreicht werden können. Eine langfristige SOC Speicherung ist allerdings nur möglich, wenn diese Maßnahmen langfristig (mindestens 20 Jahre) aufrechterhalten bleiben. Da dies aus heutiger Sicht nicht gewährleistet werden kann, ist dringend zu hinterfragen, ob die Erwartungen bezüglich Humus erhöhender Bewirtschaftungsmaßnahmen an den Klimaschutz und den damit einhergehenden „Zertifikatehandel“ nicht zu hoch gegriffen sind (Paul et al., 2022). Humus erhaltende und potenziell erhöhende Maßnahmen sind allerdings notwendig, um zahlreiche ökologische Bodenfunktionen (z.B. Speicherfunktion für Wasser und Nährstoffe, Biodiversität, Pufferfunktion für Schadstoffe) bzw. die Bodengesundheit zu fördern. Zudem wird unter Klimawandelbedingungen (höhere Temperaturen, etwa gleichbleibende

Niederschlagssummen) ein höherer SOC Umsatz erwartet (ACC, KLIEN Projekt, 2015) und daher ein erhöhter C-Input notwendig werden, um die SOC Vorräte zu erhalten bzw. zu steigern (Bruni et al, 2021 und 2022).

Grünland - WP 3

Aufgrund von COVID-19 (eingeschränkte Dienstreisen) konnten die Untersuchungen nicht an den geplanten Untersuchungsstandorten durchgeführt werden. An der HBLFA Raumberg-Gumpenstein wurden im Jahr 1971 Dauergrünlandversuche mit 10 verschiedenen Düngungsvarianten angelegt. Als Alternative wurden diese Langzeitversuche beprobt und analysiert. Die bisherigen Untersuchungsergebnisse sind in der Masterarbeit von Sebastian Wieser zusammengefasst.

Die Abbildung 6 zeigt die Kohlenstoffgehalte in den Böden der untersuchten mineralischen und organischen Düngungsvarianten. Die Abbildung macht deutlich, dass nach 38jähriger Bewirtschaftung mineralische Düngungsvarianten z.T. ähnliche Gesamt SOC Gehalte aufweisen wie die Stallmist+Jauchevariante, und bei dieser die höchsten Anteile in den SOC Fraktionen < 63 µm gebunden sind, was auf eine höhere Stabilisierung hinweist.

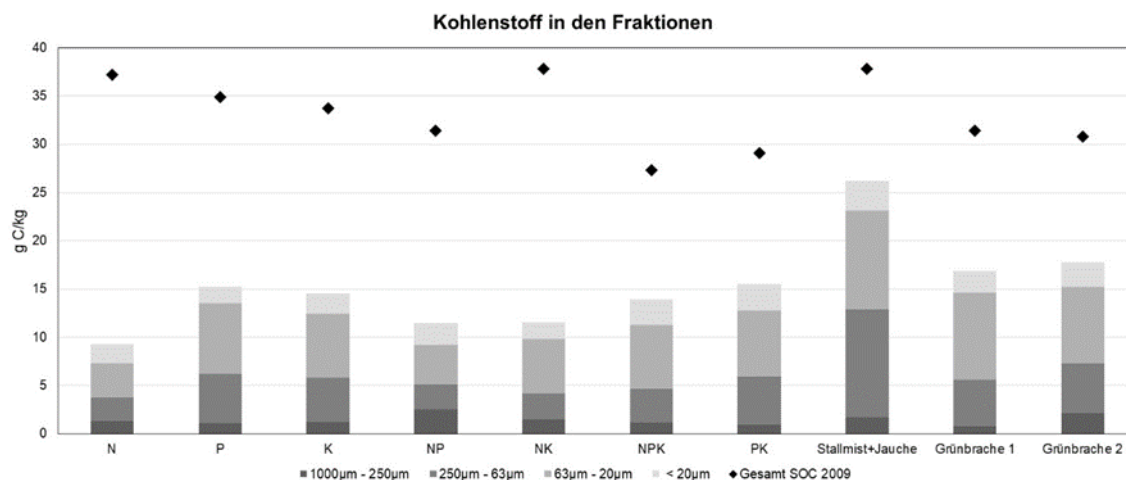


Abbildung 6: Kohlenstoffgewichte der vier Bodenfraktionen bei Düngungsvarianten am Standort Raumberg-Gumpenstein

Eine weitere wichtige Aktivität war die Bestimmung von Wurzelmassen in Dauergrünlandböden. Pflanzenwurzeln sind wichtige Kohlenstoffspeicher und Humusbildner. Allerdings gibt es in Österreich nur wenig publizierte Daten über die Wurzelmasse in Grünlandökosystemen. Wesentlicher Grund hierfür ist der enorm hohe Arbeitsaufwand für die Quantifizierung der Wurzelmasse.

Die wichtigste Aktivität war die Durchführung einer Literaturstudie über Humus in Dauergrünlandböden. Dabei wurden mehr als 200 wissenschaftliche Arbeiten berücksichtigt. Die Literaturstudie wurde zur Veröffentlichung vorbereitet. Das primäre Ziel der Literaturstudie war es, den derzeitigen Wissensstand zum Thema Humus und Humusdynamik in Dauergrünlandböden zusammenzufassen

und konkrete Maßnahmen zur Erhaltung oder Erhöhung der Humusvorräte in Dauergrünlandböden vorzuschlagen. Mit der Literaturstudie soll ein Beitrag zu einer effizienten und effektiven klimafreundlichen Humuswirtschaft im Dauergrünland geleistet werden. Außerdem sollen humusrelevante Daten und Informationen für nationale und internationale Berichtspflichten bereitgestellt werden. Insgesamt soll mit dieser Literaturstudie ein Beitrag zur Verminderung der gegenwärtig noch erheblichen Daten- und Kenntnisdefizite auf dem Gebiet der angewandten Humusforschung im Grünland geleistet werden.

In unserer Literaturstudie wurde deutlich, dass Dauergrünlandböden in Österreich aufgrund ihrer hohen Humusvorräte und beträchtlichen Flächengröße wichtige Speicher von organischem Kohlenstoff sind. Humusgehalt und Humusvorrat sind auf vergleichbaren Standorten deutlich höher als in Ackerböden. Im Dauergrünland werden ca. 90 % vom gesamten organischen Kohlenstoffvorrat im Boden gespeichert. In österreichischen Dauergrünlandböden beträgt der Vorrat an organischem Bodenkohlenstoff in 0-30 cm Bodentiefe im Durchschnitt 93 t C pro Hektar. Beträchtliche Mengen an organischem Kohlenstoff (> 40 %) werden im Unterboden (10-50 cm) gespeichert. Unterböden haben ein großes Potenzial zur langfristigen Bodenkohlenstoffsequestrierung. Klima, Bodeneigenschaften (insbesondere Bodenwasserhaushalt), Vegetationstyp und Bewirtschaftungsintensität (Düngung, Nutzungshäufigkeit) prägen den Humusgehalt und Humusvorrat von Dauergrünlandböden. Pflanzenwurzeln und kohlenstoffreiche organische Dünger (Mist, Stallmistkompost) sind die wichtigsten Ausgangssubstanzen für die Humusbildung. Im Dauergrünland ist die Bodenkohlenstoffspeicherung bei mittlerer Bewirtschaftungsintensität (2-4 Nutzungen pro Jahr, jährliche entzugsorientierte Düngung mit Mist oder Stallmistkompost) am höchsten. Eine Humusanreicherung erfolgt in Dauergrünlandböden sehr langsam und ist nur bis zur Erreichung des höchstmöglichen lokalen Ertragspotenzials sinnvoll. Im Dauergrünland sind humuserhaltende und humusqualitätsfördernde Maßnahmen wichtiger als humussteigernde Maßnahmen, weil eine nachhaltige Humusvorratszunahme nur sehr langfristig in geringem Maße möglich ist (Smith, 2004; Hopkins et al., 2009; Flessa et al., 2018; Drexler et al., 2022) und der positive Effekt von humussteigernden Maßnahmen auf Ertrag, Futterqualität und Ertragssicherheit in typischen Dauergrünlandböden normalerweise gering ist. In humusreichen Dauergrünlandböden kann eine nachhaltige Steigerung der Bodenfruchtbarkeit vor allem durch Maßnahmen zur Verbesserung der Humusqualität (Einengung des C:N-Verhältnisses im Oberboden) und zur Beschleunigung des jährlichen Humusumsatzes im Boden erzielt werden. Bei der Auswahl und Umsetzung von humuserhaltenden oder humussteigernden Maßnahmen müssen Zielkonflikte mit Klima- und Naturschutz, Nebenwirkungen und zusätzliche positive Umweltwirkungen berücksichtigt werden. Eine Nebenwirkung der Wiedervernässung von entwässerten Mooren ist die Abnahme der Tragfähigkeit des Bodens. Die negativen Folgen sind eine schlechtere Befahrbarkeit und somit erschwerte Bedingungen bei der Streuwiesenmahd

sowie eine erhöhte Gefahr von Trittschäden bei Weidenutzung. Andererseits sind positive Umweltwirkungen z.B. die Einsparung von Mineraldünger und Saatgut bei Verminderung der Nutzungsintensität im Intensivgrünland oder die Vermeidung von langen Transportwegen bei Verwendung von Einstreumaterial aus lokalen oder regionalen Streuwiesen anstelle von Stroh aus in- und ausländischen Ackerbauregionen.

Wald - WP 4

Die Zielsetzung des Arbeitspaketes Wald war die Quantifizierung der Effekte von verschiedenen Klimawandel-Anpassungsmaßnahmen auf den Kohlenstoff-Vorrat in Waldböden. In Kürze: „welche Anpassungsmaßnahmen der Waldbewirtschaftung können zur Minderung des Klimawandels am besten beitragen?“ Die Fragestellung ist uns wichtig, weil in der Fach-Literatur und im wissenschaftlichen Diskurs sehr unterschiedliche Zahlen genannt werden. Unbestritten ist, dass die Waldböden einen sehr hohen Kohlenstoffvorrat haben und prozentuell kleine Veränderungen eine große Wirkung auf die Minderung des Klimawandels haben können. Während eine Gruppe sehr vorsichtig argumentiert und schon die Erhaltung des Kohlenstoffvorrates im Wald als Erfolg betrachtet, werden von einer anderen Gruppe hohe Erwartungen in die Rolle der (Wald-)Böden im Rahmen der Minderung des Klimawandels geweckt. Die Bodenprozesse, welche dazu führen, dass Waldböden zu Quellen oder Senken von Treibhausgasen werden, sind bekannt. Unser Ziel war, anhand von Daten aus österreichischen Geländeversuchen und Boden-Monitoringprogrammen (z.B. Waldbodenzustandsinventur) die Effekte zu quantifizieren.

Das Ergebnis der Literaturrecherche hat viele Maßnahmen bezüglich SOC Steigerungen näher betrachtet (Mayer et al., 2020), siehe Abbildung 7. Aus österreichischen Daten konnten die Effekte der Aufforstung, der Stickstoffdüngung, der Baumartenvielfalt und der Regulierung der Waldbestandesdichte untersucht werden. Andere wichtige Prozesse konnten nicht quantifiziert werden, weil keine österreichische Datengrundlage vorhanden ist.

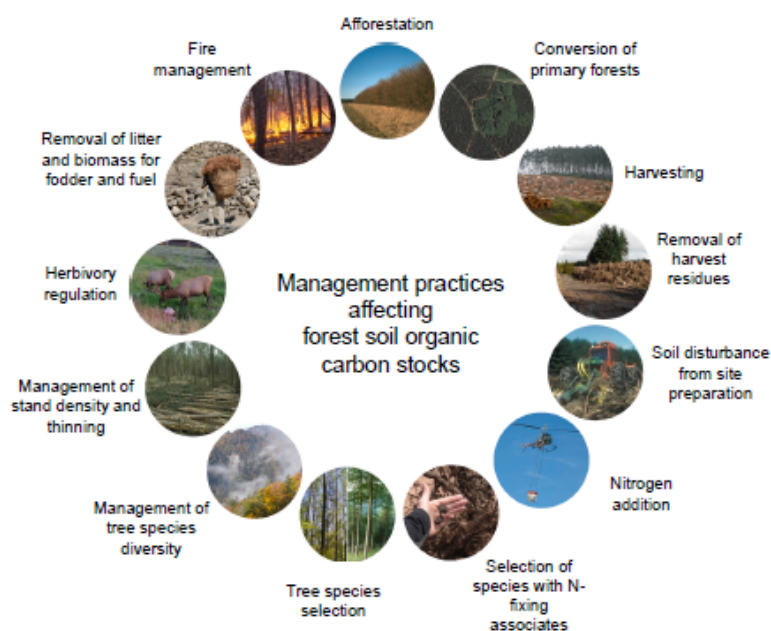


Abbildung 7 Portfolio möglicher Maßnahmen und Ereignisse, welche die Größe des Kohlenstoffvorrates im Waldboden verändern (aus Mayer et al. 2020).

Waldbodenmonitoring: Die tatsächliche Veränderung des Kohlenstoffvorrates in österreichischen Waldböden (Abbildung 8) wurde an einem Datensatz untersucht, bei dem für ein Kollektiv von Standorten eine Erhebung der Bodenkohlenstoffvorräte vorliegt. Keiner der Standorte wurde gezielt einer Behandlung unterzogen. Stattdessen fand über 20 Jahre die Bewirtschaftung unverändert statt. Die Untersuchung hat gezeigt, dass es sowohl Standorte gibt, die Senken bzw. Quellen von Treibhausgasen waren. Insgesamt waren die Waldböden eher eine kleine Senke im Ausmaß von $0,1 \text{ kg C/m}^2/\text{Jahr}$, d.h. der Kohlenstoffvorrat hat im Mittel leicht zugenommen.

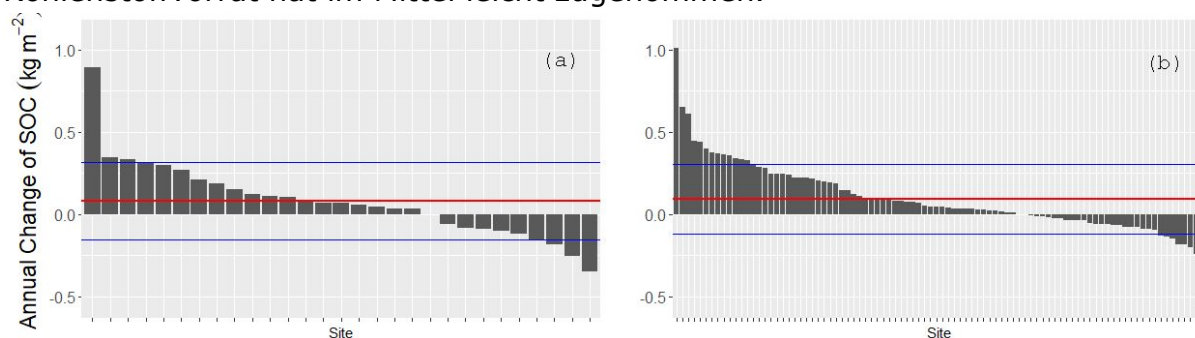


Abbildung 8 Monitoring des Kohlenstoffvorrates in österreichischen Waldböden auf (a) Karbonatstandorten und (b) Silikatstandorten (Jandl et al. 2022).

Baumartenwechsel: Ein zentrales Argument der Anpassung an den Klimawandel ist die rechtzeitige Einleitung des Baumartenwechsels. Die Hauptbaumart Österreichs, die Fichte, ist an vielen Standorten besonders anfällig für Störungen. Daher wird versucht, die Fichte an den vorhersehbaren Problemstandorten kontinuierlich zu ersetzen. Die Theorie besagt, dass tiefer wurzelnde Laubbäume einen höheren Boden-Kohlenstoffvorrat haben als Böden unter Fichtenwäldern. Aus den Daten des Waldbodenmonitorings wurde versucht, den Baumarteneinfluss auf den Bodenkohlenstoff zu identifizieren. Die Erwartungen

wurden durch die Untersuchungen nicht bestätigt, siehe Abbildung 9 (Jandl et al. 2021). Wir vermuten, dass der Grund darin liegt, dass viele Waldböden seichtgründig sind, sodass die größere Verteilung des Kohlenstoffs in den Unterboden mangels Wurzelraums nicht möglich ist.

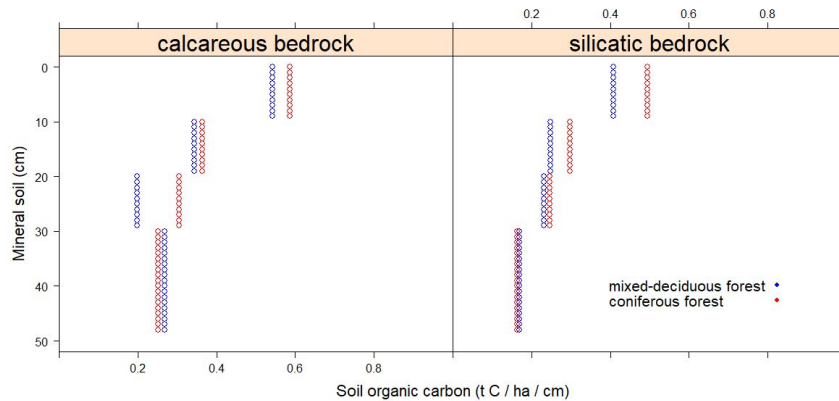


Abbildung 9: Verteilung von Bodenkohlenstoff im Bodenprofil unter Nadel- und Mischwaldbeständen (Jandl et al. 2021).

Im Modellergebnis wird langfristig eine Zunahme des Bodenkohlenstoffes durch den Baumartenwechsel erwartet (Ledermann et al. 2022), siehe Abbildung 10. Würde man die Umtriebszeit verkürzen, dann wäre eine Abnahme des Bodenkohlenstoff-Vorrates zu erwarten, weil ja die älteren Bäume, die am meisten Streueintrag in den Boden liefern, vorzeitig entnommen werden.

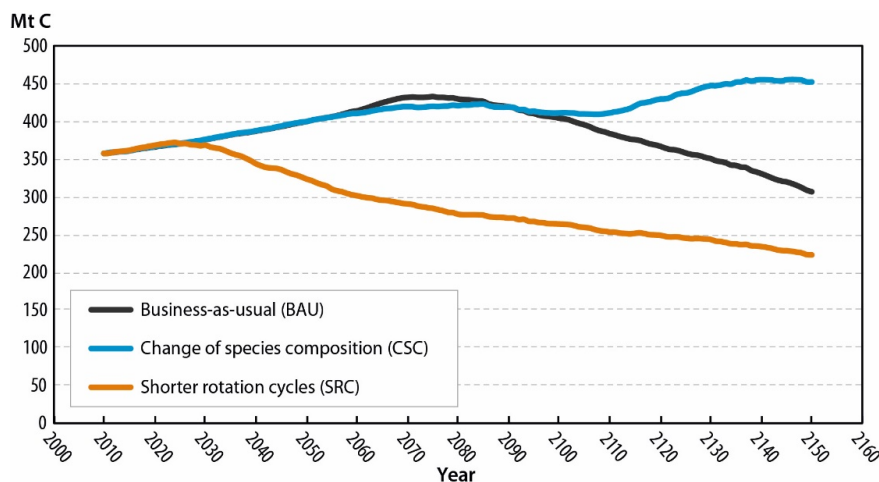


Abbildung 10 Szenario des Kohlenstoffvorrates (Biomasse und Boden) im Wald (Ledermann et al. 2022).

Ein wichtiger Aspekt von CASAS war die Beantwortung der Frage, ob mit der Regulierung der Bestandesdichte mittelfristig eine Veränderung des Bodenkohlenstoffvorrates erzielbar ist. Das Projekt bediente sich dazu einiger Waldbauexperimente, bei welchen vor Jahrzehnten gezielte Bestandesbehandlungen durchgeführt wurden. In der Abbildung 11 ist der Versuch Ottenstein dargestellt. Bei diesem Versuch stand neben den Flächen mit verschiedenen Bestandesdichten auch eine landwirtschaftlich genutzte Vergleichsfläche zur Verfügung. Es zeigt sich, dass der Kohlenstoffvorrat unter

Wald im Vergleich zum Wechselgrünland innerhalb von 25 Jahren deutlich zugenommen hat. Der Effekt kommt hauptsächlich dadurch zustande, dass sich unter Wald ein mächtiger Auflagehumus gebildet hat (Schindlbacher et al 2022). Allerdings haben sich nach 25 Jahren noch keine statistisch absicherbaren Unterschiede zwischen den Behandlungen (Bestandesdichten) ergeben.

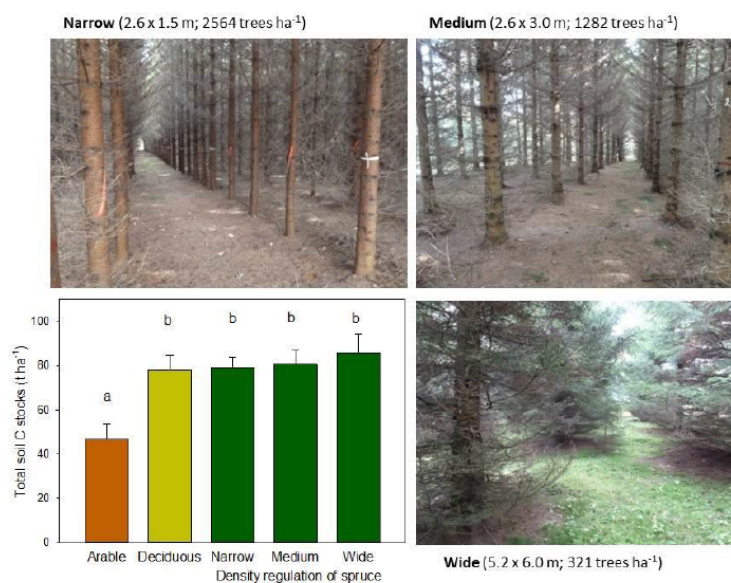


Abbildung 11 Waldbauversuch Ottenstein im Waldviertel (Schindlbacher et al 2022).

Der Versuch Hauersteig / Bezirk Wien Umgebung (Abbildung 12) wurde vor 70 Jahren angelegt. Es wurden verschiedene Pflanzverbände erprobt. Die Ergebnisse zeigen, dass in den dichtesten Parzellen der Kohlenstoffgehalt im Boden am höchsten ist. Allerdings sind dichte Bestände anfälliger für Sturmschäden. Somit kann sich ein trade-off ergeben, wenn zur Erhöhung der Bestandesstabilität eine geringe Bestandesdichte angestrebt wird, sodass weniger Bäume Streuinput in den Boden leisten.

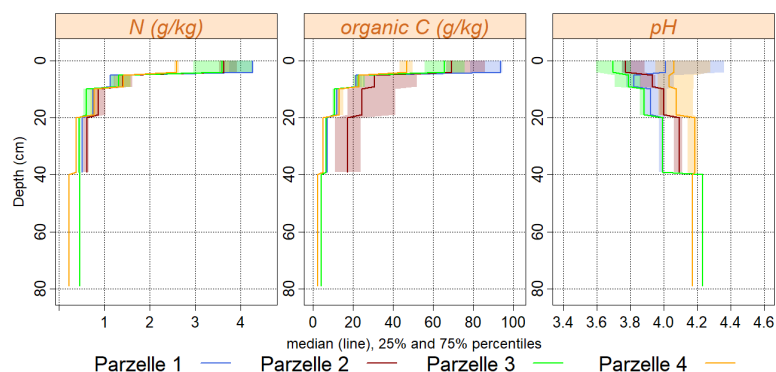


Abbildung 12 Versuch Hauersteig im Sandstein-Wienerwald mit unterschiedlich dicht bepflanzten Parzellen: ,1': 4661 / ha, ,2': 2014 / ha, ,3': 2291 / ha, ,4': 1170 / ha; noch unpubliziert.

Der Versuch Helfenberg / Mühlviertel (Abbildung 13) wurde in den 1960er Jahren angelegt. Damals war der Klimawandel kein Thema und die Anstrengungen galten der Erhöhung der Produktivität der Wälder, die durch Jahrhunderte der Übernutzung niedrige Wachstumsraten aufwiesen. Der Versuch sollte untersuchen, welchen Effekt die Kalkung und die Stickstoffdüngung auf das Wachstum von Fichten hat. Die angestrebte Wirkung war, dass durch die Behandlungen der reaktionsträge Humus im Oberboden mobilisiert wird. Dadurch sollten Nährstoffe aus dem Boden frei werden und das Baumwachstum fördern. Die Böden im Mühlviertel sind eher sauer und nährstoffarm. Daher wurde der Effekt von Nährstoffgaben auf das Baumwachstum untersucht. Die bodenkundliche Untersuchung stand damals nicht im Zentrum des Interesses. Die Abbildung 13 zeigt insgesamt einen schwachen Effekt der Nährstoffgaben auf den SOC-Gehalt des Bodens. Die Kontrollparzelle weist die höchsten Kohlenstoffgehalte auf, die gekalkten und stickstoffgedüngten Parzellen haben etwas geringere Kohlenstoffgehalte. Die Interpretation ist, dass die angestrebte Wirkung, die Mobilisierung des Auflagehumus gelungen ist. Die Mobilisierung bedeutet aber, dass der Kohlenstoffvorrat abgenommen hat. Der Versuch zeigt ein weiteres Beispiel eines trade-offs. Zu Lasten des Kohlenstoffvorrates im Boden wird das Baumwachstum angeregt.

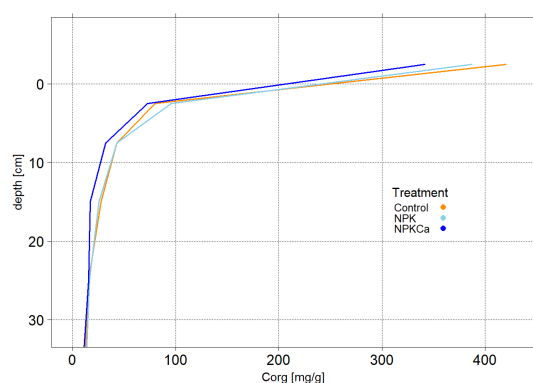


Abbildung 13 Düngungsversuch Helfenberg/Mühlviertel. Die Behandlungen sind die Kontrolle, die Düngung mit NPK, und die Düngung mit NPK mit Düngekalken; unpubliziert.

Die Untersuchung der Frage, ob die Nichtbewirtschaftung von Wäldern zur Erhöhung des Bodenkohlenstoff-Vorrates führt, konnte im Rahmen des Projektes nicht zufriedenstellend geklärt werden. In Österreich gibt es nur sehr wenige Waldbestände, die nachweislich nicht bewirtschaftet wurden. Als beste Annäherung wurden die Daten des Schutzwaldes, der aufgrund von Standortseigenschaften nicht aktiv bewirtschaftet wird, für eine Simulation herangezogen. Die Ergebnisse zeigen, dass die unbewirtschafteten Standorte höhere Bodenkohlenstoff-Vorräte aufweisen (Abbildung 14). Allerdings liegen für den ‚Schutzwald außer Ertrag‘ keine Referenzdaten aus nationalen oder internationalen Untersuchungen vor, mit welchen die Simulationsergebnisse validiert werden können. Es besteht daher eine Forschungslücke.

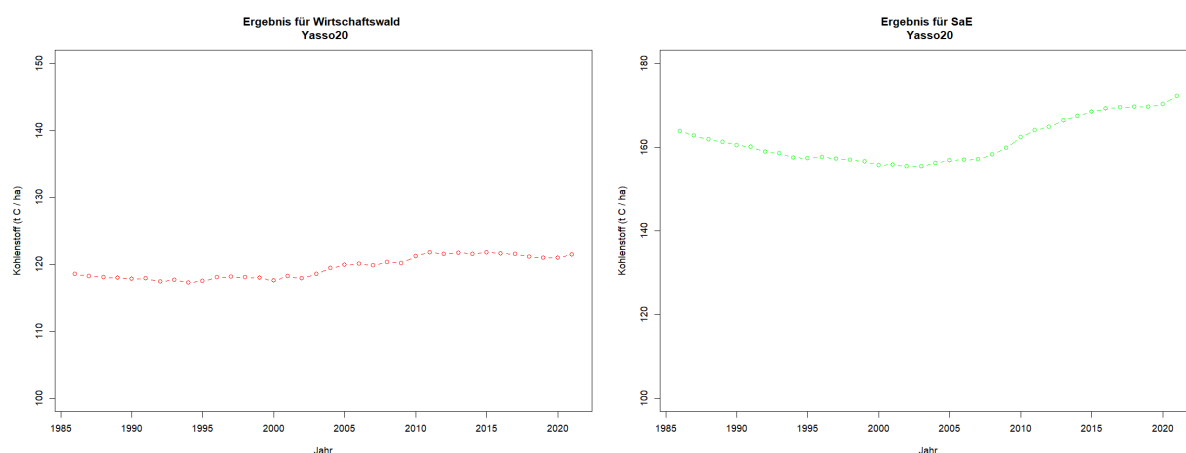


Abbildung 14 Simulierter Bodenkohlenstoffvorrat in Österreich, die auf Basis der Daten der Österreichischen Waldinventur durchgeführt wurde. Links: Wirtschaftswald, rechts: Schutzwald außer Ertrag (SaE).

Ökonomische Auswirkungen eines „4-Promille“-Szenarios – WP 5

Ziel war es, ein langfristiges "4-Promille"-Szenario für Österreich zu entwickeln, das ausgewählte Managementtechniken zur Kohlenstoffbindung im Boden (SCS) für Landwirtschaft und Grünland sowie für die Forstwirtschaft darstellt und auf den Forschungsergebnissen von WP2-4 basiert. Das Szenario wurde u.a. durch die Anwendung transdisziplinärer Forschungsansätze entwickelt, d.h. es wurden die ausgewählten SCS-Managementtechniken mit relevanten Stakeholdern aus Wissenschaft, Verwaltung und Praxis in einem Workshop, basierend auf dem interdisziplinären wissenschaftlichen Ansatz des Projektkonsortiums, diskutiert. Aufgrund der wissenschaftsbasierten Auswahl eines Portfolios von für Österreich effektiven SCS-Maßnahmen sowie der Festlegung von Flächen, auf die jede Maßnahme angewendet werden soll, wurden die folgenden SCS-Maßnahmen im CASAS "4-Promille-Szenario" bis 2030 spezifiziert.

Tabelle 2: Maßnahmenübersicht Ackerland

Maßnahmen Ackerland	ha	jährl. Kosten in € je ha	t C in 10 Jahren
Mulchsaat/Direktsaat	25.000	60	89.000
Untersaat (Kürbis, Soja, Bohne, Sonnenblume)	23.960	101	30.669
System Immergrün	33.803	142	43.268
Grün-Bracheflächen (überwiegend Biodiv.flächen)	50.548	80	161.754
Gewässerrandstreifen gemäß GLÖZ 4 (GAP Strategieplan)	4.600	501	9.200
Feldfutterbau (Grünfutterpflanzen)	54.536	0	174.515
Kompost aus Abfallanlagen	5.500	50	35.420
Biokohle	2.380	406	19.040
Agroforstwirtschaft (Hecken)	200	450	800
Böden mit hohem C-org-Gehalten (Moorböden) aus der Produktion nehmen/wieder vernässen	300	450	2.400
Gesamt			566.065

Die Art der Maßnahmen, der erwartete Flächenumfang und die erwartete Sequestrierung von Kohlenstoff sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Im Ackerland wurde die zusätzlich speicherbare Kohlenstoffmenge mit den empfohlenen Maßnahmen zwischen 128 kg je ha und Jahr (Untersaat und

System Immergrün) und 800 kg je ha und Jahr (Kompostauf- und Einbringung von Biokohle ins Ackerland, Moorböden aus der Ackerproduktion nehmen) angenommen.

Tabelle 3: Maßnahmenübersicht Grünland

	ha	zus. kg C je ha und Jahr	: C in 10 Jahren
Drainagierte Flächen nicht mehr entwässern	1.000	800	8.000
Moorflächen wieder vernässen	1.000	800	8.000
Grünlandumbruchsverbot	1.000	0	0
Extensivierung (z.B. Schnitthäufigkeit von 6 auf 4 Schnitte reduzieren oder Weidenutzung verringern)	1.000	120	1.200

Für das Grünland wurden ebenfalls Maßnahmen identifiziert und im Hinblick auf ihre Eignung zur Sequestrierung von Kohlenstoff bewertet. In Tabelle 3 sind die entsprechenden Ergebnisse – normiert jeweils auf 1.000 ha – bewertet. Aufgrund der Schwierigkeit, die Anwendung der Maßnahmen zu bestimmen, wurde darauf verzichtet, das Flächenausmaß anzugeben.

Betreffend waldwirtschaftliche Maßnahmen stehen nachhaltige Aufforstungsmaßnahmen im Vordergrund. Dabei handelt es sich in erster Linie um mehr Baumartenvielfalt. Dies ist besonders in Lagen unter 800m dringlich. Pro Jahr werden für die Bestandesumwandlung bis zum Jahr 2030 annähernd 120,000 ha aufgeforstet. Da sich aber nicht alle Waldeigentümerinnen und Waldeigentümer an die aus waldbaulicher Sicht empfehlenswerte Vorgehensweise halten werden, ist von einem geringeren Flächenumfang auszugehen, der in nachhaltiger Weise aufgeforstet wird. Es entspricht dem Stand der Technik, dass aufgeforstete Flächen umzäunt werden, um den Verlust der Pflanzung durch Wildverbiss zu verhindern. Diese Zäune werden von den Jagdpächtern finanziert.

In einem zweiten Schritt wurde das spezifizierte "4-Promille"-Szenario für das Ackerland ökonomisch bewertet. Dazu wurden die zur Umsetzung der Maßnahmen erforderlichen Kosten den Maßnahmen zugeordnet. Basierend auf den im Jahr 2020 im Agrarumweltprogramm ÖPUL gewährten Prämien, Auswertungen der Online-Datenbank der Bundesanstalt für Agrarwirtschaft und Bergbauernfragen zu Deckungsbeiträgen und eigenen Berechnungen wurden den Maßnahmen Durchschnittskosten je Hektar zugeordnet. Bei Maßnahmen, die eine landwirtschaftliche Bewirtschaftung ausschließen, wurden in der Kostenkalkulation die von Eurostat veröffentlichten Pachtpreise für Österreich im Jahr 2020 unterstellt. Dies gilt für den Stopp der Ackerproduktion bzw. die Wiedervernässung von ursprünglich drainagierten Böden und das Anlegen von Windschutzhecken bzw. anderen Hecken (Agroforstmaßnahmen). Die Kosten für den Kompost wurden anhand der Transport- und Ausbringungskosten berechnet. Es wurde die Annahme getroffen, dass der Kompost gratis abgegeben wird. Die Kosten der Biokohle wurden auf der Basis des Holzpreises für Schleifholz geschätzt.

Für die Neuanlage von agroforstwirtschaftlichen Hecken werden die einmaligen Kosten für die Pflanzung mit 3.500 € je Hektar und die Opportunitätskosten mit 450 € je ha und Jahr angesetzt. Agroforstanlagen haben freilich zahlreiche Vorteile für Natur und Umwelt, die über die Anreicherung von Kohlenstoff im Boden hinausgehen. Dieser Zusatznutzen wurde in der vorliegenden Analyse nicht bewertet. Um diesem Sachverhalt aber zumindest annähernd Rechnung zu tragen, wurden nur die Opportunitätskosten in der Berechnung berücksichtigt.

Bei einigen Maßnahmen ist die Ackernutzung nach der Anwendung der Kohlenstoff-speichernden Maßnahme nicht mehr möglich. Dies trifft zu im Fall der Wiedervernässung von einstmals drainierten Flächen und bei Agroforstwirtschaft (Hecken). Der dadurch entstehende Produktionsausfall wird bewertet anhand der durchschnittlichen Pachtpreise in Österreich, die von EUROSTAT veröffentlicht werden.

Abbildung 15 zeigt die Grenzkosten der jeweiligen Maßnahmen in Bezug auf die erwartete Festlegung von Kohlenstoff im Boden. Die einzelwirtschaftlichen Kosten ausgewählter Sequestrierungsmaßnahmen in Österreichs Acker- und Grünlandböden bezogen auf die Fläche reichen von 0 € je ha und Jahr im Feldfutterbau bis zu 450 € je ha und Jahr bei der Nichtnutzung von Moorböden (Tabellen 2 und 3).

Bezüglich der waldbaulichen Maßnahmen wurden folgende Annahmen getroffen: Die Pflanzung eines Fichtenbestandes kostet 4000 – 6000 EUR/ha, die Pflanzung eines Laubwaldes kostet 8000 – 12000 EUR/ha, somit ergeben sich Mehrkosten von etwa 5,000 EUR/ha.

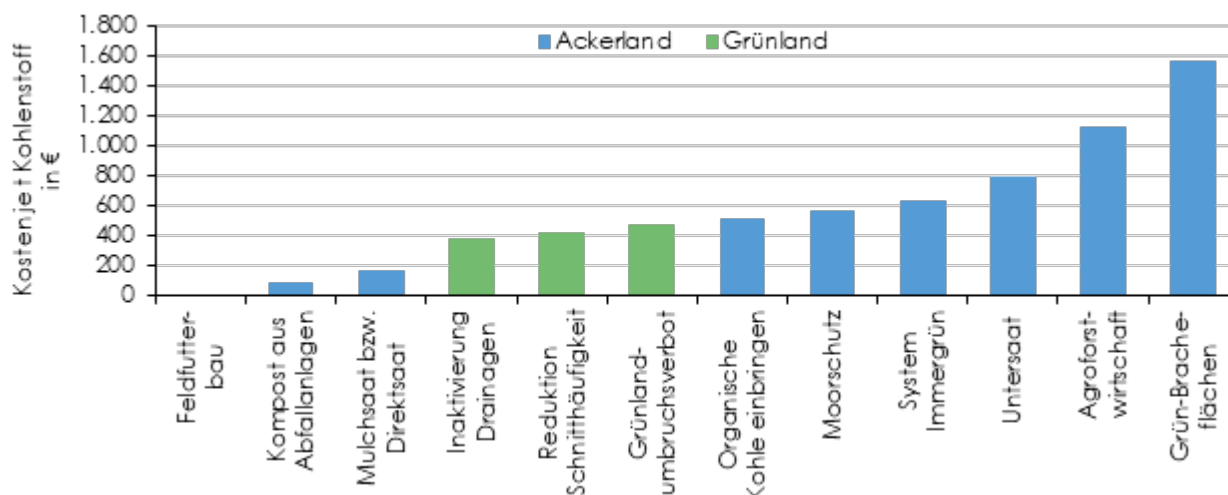


Abbildung 15: Übersicht zu den Grenzkosten der C-Akkumulation

Mit dem volkswirtschaftlichen Modell ADAGIO wurde eine Bewertung der Konsequenzen für die Volkswirtschaft vorgenommen. Dieses Modell eignet sich dazu in besonderer Weise, weil die einzelnen Sektoren, darunter Land- und Forstwirtschaft explizit dargestellt sind (vgl. dazu Sinabell und Streicher, 2021).

Durch die Umsetzung der Maßnahmen im Ackerbau entstehen zwei Arten von Kosten: a) es werden weniger Agrargüter erzeugt und b) es werden zusätzliche Vorleistungen bezogen (vor allem Maschinenleistungen und Biokohle). Die Folge davon ist, dass der Produktionsumfang in der Landwirtschaft sinkt (Flächen werden für andere Zwecke verwendet). Eine weitere Folge ist, dass andere Vorleistungen von anderen Sektoren bezogen werden, die dort eine zusätzliche Nachfrage darstellen (mehr Maschinen sind nötig, diese müssen in Gebäuden untergebracht werden, usw.). In dem Modell werden die Produktionsänderungen und die veränderten Nachfragestrukturen abgebildet. Es werden dabei die folgenden Effekte unterschieden, die in Abbildung 16 dargestellt werden:

- Direkte Effekte haben ihren Ursprung im Agrarsektor selbst. Sie beschreiben, die volkswirtschaftlichen Unterschiede des Agrarsektors im im „4-Promille“ Simulationslauf im Vergleich zum Basislauf.
- Indirekte Effekte zeigen die Auswirkungen von Veränderungen im Agrarsektor auf die "übrige Volkswirtschaft", sowohl vor- als auch nachgelagert (als Vorwärts- und Rückwärtsverflechtungen): Die Veränderungen im Niveau und in der Struktur des Einsatzes von Vorleistungen wirken sich direkt auf andere Sektoren der Wirtschaft aus (z.B. die chemische Industrie), dies sind die vorgelagerten Effekte (Rückwärtsverflechtungen). Die nachgelagerten Effekte (Vorwärtsverflechtungen) betreffen hingegen jene Sektoren, die Produkte aus dem Agrarsektor beziehen. Zusammen mit den direkten Effekten bilden die indirekten Effekte die sogenannten "Typ1-Effekte".
- Im Gegensatz zu den ersten beiden ausschließlich produktionsorientierten Effekten (d.h. sie wirken sich nur auf andere Sektoren entlang der Wertschöpfungskette aus), ergeben sich die induzierten Effekte aus Änderungen der Wertschöpfung: Änderungen der wirtschaftlichen Aktivität führen auch zu Änderungen der Löhne, Gewinne und Steuern. Dies hat Veränderungen in der Endnachfrage: Höhere Löhne führen zu höherem Konsum (oder, im Falle niedrigerer Löhne, zu geringerem Konsum). Veränderungen bei Gewinnen führen zu Veränderungen bei den Einkommen der Kapitaleigner (sowie bei den Investitionen im Falle einbehaltener Gewinne), die ebenfalls zum Konsum beitragen. Steigende Steuereinnahmen können zu steigenden Staatsausgaben (bei konstantem Haushaltsdefizit) oder zu einem niedrigeren Haushaltsdefiziten (bei konstanten Staatsausgaben) führen. In dieser Studie werden die Simulationen unter der Annahme eines konstanten öffentlichen Defizits durchgeführt. Alle induzierten Effekte stellen Multiplikatoreffekte (auch „Typ2-Effekte“ genannt) dar: Sie wirken über die Wertschöpfung und verstärken die ursprünglichen (direkten und indirekten) Effekte.

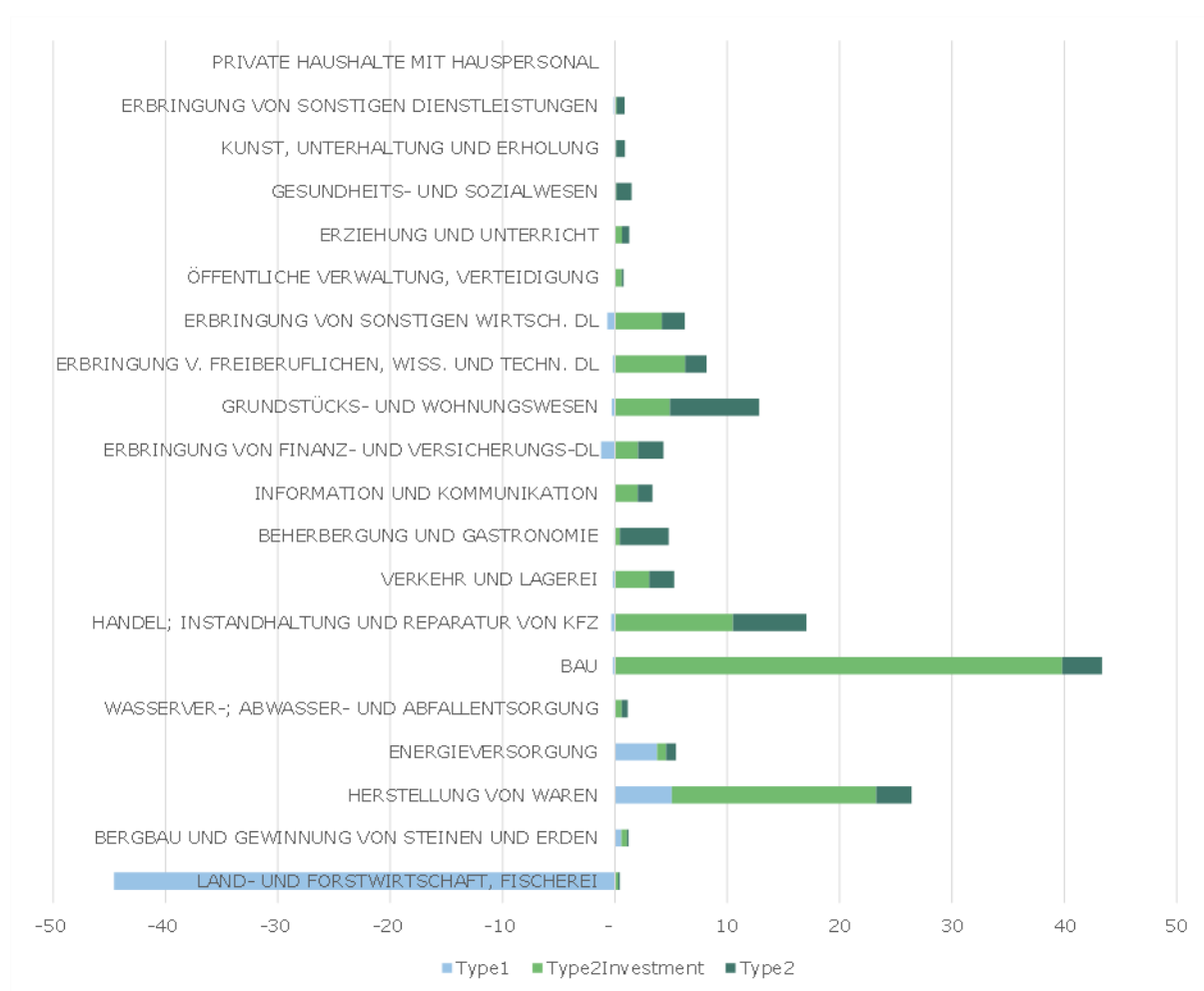


Abbildung 16: Auswirkungen auf die sektorale Wertschöpfung in der Volkswirtschaft durch die Umsetzung der Maßnahmen im Ackerbau in Millionen Euro

Die Maßnahmen in der Forstwirtschaft verhalten sich in der Volkswirtschaft neutral. Der Grund liegt in der Abbildung der Forstwirtschaft in dem Modell. Die Erzeugung des Pflanzmaterials ist dem Sektor Forstwirtschaft zugeordnet. Die höheren Kosten des Pflanzmaterials fallen ebenfalls in diesem Sektor an. Da sich die Kosten innerhalb des Sektors verlagern, gibt es keine Wechselwirkungen mit anderen Sektoren, daher sind keine volkswirtschaftlichen Auswirkungen messbar.

Der Output im Sektor Landwirtschaft geht zurück, auch Wertschöpfung und Vorleistungen. Damit sind die Type1-Effekte (die über die Vorleistungen laufen) negativ. Da allerdings die Vorleistungsstruktur sich verändert (Chemie sinkt, Energie steigt, Instandhaltung steigt), ergeben sich auch Sektoren mit positivem Wertschöpfungseffekt. Die Investitionen steigen an, damit drehen die Type2-Effekte inklusive Investitionen ins Positive. Die Type2-Effekte, die zusätzlich die Konsumausgaben berücksichtigen, verstärken diesen positiven Effekt; es bleibt der Landwirtschaftssektor mit negativem Wertschöpfungseffekt. Die übrigen Wirtschaftsbereiche können ihre Wertschöpfung etwas vergrößern. In Summe ergibt sich damit ein leicht expansives Ergebnis von rund 100 Mio. € pro Jahr an Wertschöpfung. Die Wirkung auf die sektorale Beschäftigung folgt im

Wesentlichen der Wertschöpfung (wie zu erwarten), aufgrund unterschiedlicher Produktivitäten allerdings mit etwas anderen Amplituden.

In einem dritten Schritt wurden die sogenannten „Co-Benefits“ (Zusatznutzen) von SCS-Maßnahmen qualitativ bewertet. Wie Maßnahmen zur Minderung von Treibhausgasemissionen führen auch Maßnahmen zur Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Boden zu Zusatznutzen bzw. Nebeneffekten. So wird der Erhöhung des Kohlenstoffgehalts im Boden zur Stärkung der Senkenfunktion positive Auswirkungen auf die Bodenstruktur, die Wasserqualität und -menge, die Bodenerosion und die Versorgung mit Pflanzennährstoffen zugeschrieben. SCS-Maßnahmen zeigen ebenfalls positive Auswirkungen auf die biologische Vielfalt und die Aufrechterhaltung von Ökosystemleistungen, die für die landwirtschaftliche Produktivität entscheidend sind (Amelung et al., 2020; Tang et al., 2016; Meyer und Markytan, 2022). Durch die Humusbildung kann die Kohlenstoffbindung eine entscheidende Rolle bei der Verbesserung der Bodenqualität und der Ernährungssicherheit spielen. Die Höhe des Kohlenstoffgehalts im Boden wird somit als ein wichtiger Qualitätsmaßstab für die pflanzliche Erzeugung und die nationale und regionale Ernährungssicherheit betrachtet (Baumgarten et al., 2021).

Neben der Abschwächung des Klimawandels durch Erhöhung der Kohlenstoffbindung im Boden bieten SCS-Maßnahmen gleichzeitig Vorteile für die Anpassung landwirtschaftlicher Systeme an den Klimawandel (Amelung et al., 2020; Smith et al., 2020). Qiao et al. (2022) beispielsweise untersuchen die entscheidende Rolle der Bodenqualität in der Landwirtschaft unter den Bedingungen des Klimawandels in China. Demnach weisen qualitativ hochwertige Böden eine geringere Empfindlichkeit (Vulnerabilität) für Schwankungen der Ernteerträge gegenüber den Auswirkungen des Klimawandels auf als degradierte Böden, z. B. höhere durchschnittliche Ernteerträge ($10,3 \pm 6,7$ %) und eine höhere Ertragsstabilität (Verringerung der Schwankungen um $15,6 \pm 14,4$ % bei allen untersuchten Kulturarten und Umweltbedingungen). Unter dem Gesichtspunkt der Ernährungssicherheit verbindet die "4-Promille"-Initiative somit die Notwendigkeit, die Bodengesundheit für die Ernährungssicherheit zu erhalten oder zu verbessern, mit den Möglichkeiten, den Klimawandel abzuschwächen (Amelung et al., 2020).

Während durch die Umsetzung von SCS-Maßnahmen zahlreiche Co-Benefits für die Lebensgrundlagen, die Biodiversität, die Wasserversorgung und die Ernährungssicherheit realisiert werden können, vermeiden SCS-Maßnahmen im Bereich Acker- und Grünland zusätzlich indirekte Landnutzungsänderungen mit potenziell negativen Auswirkungen auf die THG-Emissionen, da die Maßnahmen auf bereits bewirtschafteten Flächen durchgeführt werden. Anders verhält es sich ggf. bei der Aufforstung, die häufig auf Ackerland vorgenommen wird und somit Landnutzungsänderungen mit sich bringen kann.

Die Abschätzung oder Quantifizierung der Zusatznutzen von SCS-Maßnahmen, wie z. B. die Förderung der biologischen Vielfalt oder die Regulierung der

Wasserkreisläufe, die Verringerung der Erosion oder andere gesellschaftliche Vorteile, die sich aus Veränderungen in der Landbewirtschaftung ergeben, wie z. B. die Aufrechterhaltung eines hohen und widerstandsfähigen Produktivitätsniveaus trotz zunehmender Auswirkungen des Klimawandels (Extremwetterereignisse), kann dazu beitragen, die gesellschaftliche Akzeptanz dieser Maßnahmen zu erhöhen und die privatwirtschaftlichen Vorteile der Maßnahmen für die Landwirte herauszustellen (Amelung et al., 2020).

Organischer Kohlenstoff im Boden und Sustainable Development Goals (SDGs) - WP 6

Wir bewerteten die Auswirkungen der 4-Promille-Initiative auf ausgewählte Ziele für nachhaltige Entwicklung (SDGs), einschließlich der Bewertung von Kompromissen für verschiedene Ökosystemleistungen, und diskutierten, ob eine erfolgreiche Umsetzung von 4-Promille-Strategien das Ranking Österreichs im SDG-Index verbessert. Zu diesem Zweck wurden die 15 SDGs und die 169 von der UNO definierten Ziele analysiert. Unsere Ergebnisse zeigen, dass das Wort "Boden" nur in vier Zielen vorkommt (2.4. Verbesserung der Bodenqualität, 3.9. Verringerung der Todesfälle durch Bodenverschmutzung, 12.4. Verringerung der Freisetzung von Chemikalien in den Boden, 15.3. Wiederherstellung degradierter Böden). Ferner wurden die 226 Indikatoren untersucht, die zur Bewertung des Grades der Zielerreichung herangezogen werden. Nur unter dem Indikator 15.3 wird der organische Kohlenstoffbestand des Bodens als Indikator verwendet, und in der Tat wird er aus der Liste der Indikatoren gestrichen und stattdessen der Kohlenstoffbestand des Ökosystems verwendet. Wir kommen also zu dem Schluss, dass die organischen Kohlenstoffvorräte des Bodens zwar für die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und die Nahrungsmittelproduktion (SDG2), die Regulierung des Wasserkreislaufs (SDG6), die Vermeidung von CO₂-Emissionen (SDG13) und die Bereitstellung angemessener Lebensräume für die biologische Vielfalt (SDG15) von entscheidender Bedeutung sind, dass diese Vorteile jedoch bei der Bewertung unseres Erreichungsgrades der SDGs nicht berücksichtigt werden. Infolgedessen würde die Umsetzung von 4-Promille-Strategien den Rang eines Landes im SDG-Index nicht verändern. Die Aufnahme eines SOC-Indikators in die SDG-Rangliste könnte jedoch Anreize für die Länder schaffen, nationale Programme für eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung umzusetzen und die herausragende Rolle des Bodens bei der Verwirklichung der SDGs zu verdeutlichen.

Wir haben die Bedeutung der organischen Kohlenstoffvorräte des Bodens und der Sequestrierungsraten des Bodens für verschiedene Ökosystemleistungen für die Erreichung mehrerer SDGs weiter analysiert. Darüber hinaus schlagen wir zwei quantitative, verlässliche Indikatoren vor, die auf den Vorräten an organischem Bodenkohlenstoff (SOC) im Ackerland basieren und zur Bewertung der Erfüllung der SDGs auf nationaler Ebene für alle Länder beitragen sollten: Ein Indikator konzentriert sich auf die aktuellen SOC-Bestände im Ackerland im Vergleich zur ursprünglichen Vegetation (zeigt die potenzielle Speicherung oder die Verluste)

und der andere Indikator berücksichtigt Veränderungen im Laufe der Zeit als Auswirkung des Bodenmanagements. Wir erwähnen die derzeitigen Wissenslücken, die für die Anwendung des Indikators auf globaler Ebene erforderlich sind, und verwenden Österreich als Fallstudie, um die Anwendung der Indikatoren zu veranschaulichen.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

(max. 5 Seiten)

Beschreibung der wesentlichen Projektergebnisse. Welche Schlussfolgerungen können daraus abgeleitet werden, welche Empfehlungen können gegeben werden?

Acker

- SOC-Anstieg von 4 Promille in Feldversuchen und einzelnen Boden-Monitorings wurde teilweise erreicht, insbesondere bei (höherem) Eintrag von organischem Material, reduzierter Bodenbearbeitung und Bodenbedeckung über das Jahr in den letzten 30 Jahren.
- Auswertungen der BZI Steiermark zeigen, dass über einen Zeitraum von 20 bis 30 Jahren ein durchschnittlicher jährlicher Anstieg des SOC-Gehalts von 0,02 % in Ackerböden und 0,13 % in Grünlandböden zu verzeichnen war, was weit vom 4-Promille-Ziel entfernt ist (Minasny et al. 2017). Die jährlichen Veränderungen waren nicht linear und reichten von -1,9% bis +2,2 % mit einem positiven Median in Grünland und einem negativen Median in Ackerböden.
- Eine Abflachung der jährlichen SOC Zunahmen durch humusfreundliches Bodenmanagement wurde aus Monitoringdaten (z.B. Dersch, 2019) und CASAS Versuchsergebnissen ersichtlich.
- Langfristige Auswirkungen der Bewirtschaftung (z. B. Management von Ernterückständen und Bodenbearbeitung) auf die SOC-Speicherung treten bis in Tiefen von mehr als 60 cm auf.
- Bei Monitorings und Langzeitfeldversuchen sind wegen hoher Streuungen regelmäßige Messungen (zumindest alle 2 bis 3 Jahre) erforderlich, um die SOC Veränderungen korrekt zu dokumentieren.
- Weitere limitierte Steigerungen der C-Sequestrierung sind in Ackerböden nur durch umfassende Bewirtschaftungsänderungen (wo noch nicht erfolgt) möglich:
 - Pflanzendecke über das Jahr muss so lange wie möglich etabliert sein: Ackerkulturen gefolgt von Zwischenfrüchten/Begrünungen und/oder Leguminosen als Futterpflanzen, Ernterückstände am Feld belassen

- Sortenwahl der Kulturpflanzen und Wurzelentwicklung müssen in Zukunft mehr beachtet werden
- Anwendung qualitativ hochwertigen Sekundärrohstoffdünger
- reduzierte Bodenbearbeitung
- Etablierung von Hecken
- Schutz von Moorböden
- Zusätzliche Treibhausgasemissionen durch humusfreundliche Bodenbewirtschaftung müssen berücksichtigt werden
- Eine langfristige Weiterführung verbesserter Bewirtschaftungsmethoden ist für eine SOC Aufrechterhaltung bzw. Steigerung notwendig.
- Unter dem Klimawandel wird der erforderliche C-Eintrag steigen müssen.
- Neben CO₂-Speicherung sind insbesondere Aspekte der Bodengesundheit bzw. der Nährstoffkreisläufe für die Ernährungssicherung entscheidend.
- Die 4-Promille-Initiative kann ein wichtiges Instrument für die Sensibilisierung für den Boden sein.
- Allerdings muss das 4-Promille-Ziel kritisch hinterfragt werden: Eine Erhöhung der Humusvorräte des Bodens zur Kompensation von CO₂ Emissionen durch fossile Energieträger könnte zur weiteren Inaktivität des fossilen Sektors führen.
- Oberstes Ziel ist es, die Humusvorräte im Boden zumindest zu erhalten.

Grünland:

Im Dauergrünland sind folgende Maßnahmen zum Erhalt oder zur nachhaltigen Erhöhung der Humusvorräte im Boden wichtig:

- keine Umwandlung von Dauergrünland in Wechselgrünland oder Ackerland (Verzicht auf Grünlandumbruch)
- Aufrechterhaltung einer mittleren Bewirtschaftungsintensität (keine weitere Nutzungsintensivierung)
- boden- und vegetationsschonendes Weidemanagement (Vermeidung einer langjährigen Überbeweidung)
- Förderung der Bodendurchwurzelung (insbesondere Tiefendurchwurzelung) durch Vermeidung von Bodenverdichtung, Bodenstrukturschäden und Übernutzung der Grünlandflächen
- jährliche entzugsorientierte Düngung mit Wirtschaftsdüngern, insbesondere Mist oder Stallmistkompost
- Erhöhung des Deckungsgrades von Tiefwurzlern im Pflanzenbestand
- Förderung von anezischen Regenwurmarten

- Erhaltung des aktuellen Grundwasserstandes in nicht entwässerten hydromorphen Böden oder Anhebung des Grundwasserstandes in entwässerten hydromorphen Böden (keine Entwässerung von intakten Niedermooren bzw. Wiedervernässung von entwässerten Niedermooren; keine Neuanlage von Drainageeinrichtungen bzw. Beseitigung oder Inaktivierung von bereits bestehenden Drainageeinrichtungen)
- Förderung von Tierhaltungssystemen mit Mist und Einstreumaterial aus lokalen oder regionalen Streuwiesen
- Gülleseparierung und Ausbringung der Feststofffraktion auf Grünlandflächen.

Wald

- Waldböden speichern mehr Kohlenstoff als landwirtschaftlich genutzte Böden (Ausnahme Moorboden)
- Die räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften ist hoch, daher ist ein beträchtlicher Aufwand in Bezug auf Probenanzahl und Bodenanalytik notwendig, um mögliche Unterschiede zwischen Behandlungen statistisch absichern zu können.
- Im Bodenmonitoring ergibt sich eine Balance zwischen Standorten, die innerhalb von 20 Jahren eine Quelle oder Senke von Kohlendioxid aus dem Abbau oder Aufbau von Kohlenstoffvorräten in Böden sind. Insgesamt ist die Bilanz leicht positiv (d.i. eine Kohlenstoffsенке); der Effekt ist statistisch nicht von Null unterscheidbar.
- Der angestrebte Baumartenwechsel, durch den die Wälder widerstandsfähiger gegenüber den Folgen des Klimawandels werden sollten, hat wenig Effekt auf den Kohlenstoffvorrat im Boden. Allerdings sind noch nicht genügend Daten verfügbar, um diesen Befund zu erhärten.

Wirtschaftliche Effekte

Ökonomische Studien, die das Kohlenstoffmanagement in Böden analysieren und die Kosten der CO₂-Sequestrierung dieser Maßnahmen berechnen, berücksichtigen in der Regel die Zusatznutzen in ihrer Bewertung nicht. Das heißt, SCS-Maßnahmen (Maßnahmen zur Kohlenstoffsequestrierung in Böden) werden potenziell in ihrem Nutzen unterbewertet bzw. dadurch als zu kostspielig bewertet. Daraus ergibt sich Forschungsbedarf in der Bewertung und Quantifizierung der Zusatznutzen von SCS-Maßnahmen, sowohl in biophysikalischer als auch in monetärer Hinsicht. Durch die Einbeziehung von Co-Benefits in die Kosten- oder Nutzenschätzungen von SCS-Maßnahmen kann ein realistischeres Bild dieser Maßnahmen vermittelt und es könnten potenziell niedrigere netto Sequestrierungskosten berechnet werden, was auch die gesellschaftliche Akzeptanz solcher Maßnahmen erhöhen dürfte.

Praktiken, die die organischen Kohlenstoffvorräte in landwirtschaftlichen Böden, Grünland und Waldböden erhalten bzw. erhöhen sind generell gut etabliert und

gehören zu den Bewirtschaftungspraktiken, die zur Sicherstellung der Ernährungssicherheit im Kontext des Klimawandels beitragen können, erfordern aber zusätzliche politische Maßnahmen und Rahmenbedingungen für ihre Umsetzung. Aus wirtschaftlicher Sicht ist davon auszugehen, dass Landwirte ihre Produktion nur dann auf weitere Maßnahmen zur Kohlenstoffbindung umstellen werden, wenn die Änderung der Verfahren rentabel erscheint. Da SCS-Maßnahmen in der Regel jedoch mit zusätzlichen Kosten für den einzelnen Landwirt bzw. die einzelne Landwirtin verbunden sind und die mit diesen Maßnahmen verbundenen Vorteile z.T. der Gesellschaft als Ganzes zugutekommen, i.d.R. jedoch nicht vergütet werden, sollte die Umstellung auf eine klimafreundliche und widerstandsfähige Landwirtschaft durch geeignete agrarpolitische Programme und finanzielle Anreize, wie sie etwa aus den ÖPUL-Programmen bekannt sind, unterstützt werden.

Darüber hinaus gibt es erhebliche Herausforderungen bei der Überwachung und dem Monitoring der Umsetzung der Maßnahmen zu bewältigen. Fragen der Sättigung der Kohlenstoffaufnahme in Böden sowie der Dauerhaftigkeit der Speicherung sind Schlüsselaspekte, die bei der Konzeption von SCS-Maßnahmen berücksichtigt werden müssen und für eine Eignung als SCS-Maßnahmen relevant sind. Zu diesem Zweck ist die Einrichtung und Aufrechterhaltung einer umfassenden Bodenüberwachung von entscheidender Bedeutung, ebenso wie eine langfristige Perspektive, die die zunehmenden Auswirkungen des Klimawandels auf Produktion und Produktivität berücksichtigt. Die vorgeschlagenen SCS-Maßnahmen würden schließlich auch einen bioregionalen Ansatz in der Konzeption von SCS-Maßnahmen ermöglichen.

Wir analysierten die Auswirkungen der 4-Promille-Initiative auf ausgewählte Ziele für eine nachhaltige Entwicklung (SDGs) und meinen, dass eine erfolgreiche Umsetzung von 4-Promille-Strategien das Ranking Österreichs im SDG-Index verbessern könnte. Dazu wurden 2 neue quantitative Indikatoren vorgeschlagen, wobei ein Indikator die aktuellen SOC-Vorräte im Ackerland im Vergleich zur ursprünglichen Vegetation wiedergibt (zeigt die potenzielle Speicherung oder die Verluste) und der andere Indikator berücksichtigt Veränderungen im Laufe der Zeit als Auswirkung des Bodenmanagements. Diese Entwicklung könnte eine Wissenslücke bezüglich SOC Sequestrierung und SDG Indikatoren schließen.

C) Projektdetails

6 Methodik

(max. 10 Seiten)

Begründung und Darstellung des gewählten Forschungsansatzes.

WP Acker

Zunächst wurde eine Literaturrecherche durchgeführt (Tiefenbacher et al., 2021).

Zur aktuellen Abschätzung des SOC-Sequestrierungspotenzials (zumeist Daten von 0-25 bzw. 30 cm vorhanden) wurden ausgewählte Parzellen bestehender Langzeitversuche der AGES (Bodenbearbeitungsversuch Fuchsenbigl sowie die Ernterückstandsversuche im Marchfeld und Alpenvorland) neu und in Tiefen bis zu 75 cm beprobt und die Lagerungsdichte (zur Berechnung von SOC Vorräten) und SOC - sowie weitere Bodenparameter bestimmt (siehe Appendix und Masterarbeit Philipp de Jong). Am Kompostversuch Ritzlhof wurden an ausgewählten Parzellen Lagerungsdichten bestimmt und mit den zuletzt verfügbaren Daten an organischem Bodenkohlenstoff (2018) Vorräte an organischem Kohlenstoff berechnet.

Insgesamt wurden zur Abschätzung regionaler SOC-Speicherpotenziale (4per-mille-Ziel) anhand von Versuchs/Monitoringdaten folgende Daten analysiert:

- AGES Versuche
 - Bodenbearbeitungsversuch Fuchsenbigl, Marchfeld, seit 1988)
 - Verbleib/Abfuhr der Ernterückstände (Marchfeld, Alpenvorland): Die Entwicklung der SOC Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff über die gesamte Versuchslaufzeit wird beispielsweise für zwei AGES Feldversuche über Ernterückstände (Marchfeld, Alpenvorland) dargestellt.
 - Kompostversuch Oberösterreich (Messungen BD im Projekt, Analysen 2018).
- Versuchsdaten NÖ: Bodenbearbeitungsversuche
 - Mistelbach, Pixendorf, Pyhra (Klik and Rosner, 2020)
 - Hollabrunn (Sae-Tun, Bodner et al. (2022): nicht verwendet, da Probennahme nur 0-15 cm.
- Versuchsdaten Steiermark zu mineralischer N-Düngung und organischer Düngung (Gülldüngung) wurden vom Versuchsreferat des Landes Steiermark zur Verfügung gestellt (Schantl, persönliche Mitteilung, 2022)
- BZI Monitoringdaten Steiermark: An wiederholten Messungen in der Steiermark wurden die Veränderung der Kohlenstoffgehalte über die Zeit untersucht. In dem vom Amt der Steiermärkischen Landesregierung zur Verfügung gestellten Datensatz wurden 53 Acker- und 55 Grünlandstandorte in 14 verschiedenen Bezirken identifiziert und ausgewertet.
- AT Veröffentlichungen: Wenzel et al., 2022; Rosinger et al., 2022

BZI Daten des Landes OÖ (Wiederholungsbeprobungen) wurden angefragt, konnten uns allerdings nicht zur Verfügung gestellt werden.

Ausgehend von der Ausarbeitung der Methodik und den Berechnungen im EJP Soil Projekt „CarboSeq“ wurden – wenn die Daten verfügbar waren – sowohl

relative SOC Vorrats-Änderungen als auch die aktuellen jährlichen SOC Vorrats-Änderungen berechnet:

- Relative SOC Vorrats-Änderungen (=SOC Vorräte optimierte Bewirtschaftung/SOC Vorräte Kontrolle) nach einer bestimmten Anzahl von Jahren (mindestens 10)
- Aktuelle jährliche SOC Änderungen (=SOC Vorräte optimierte Bewirtschaftung minus SOC Kontrolle)/Anzahl der Jahre (in kg C ha⁻¹yr⁻¹)

WP Grünland

Eine Literaturrecherche wurde durchgeführt. Ein Langzeitversuch der HBLFA Raumberg-Gumpenstein wurde beprobt.

Der Langzeitversuch wurde 1971 angelegt. Die 10 Versuchspartellen haben jeweils eine Fläche von 20 m². Die Versuchspartellen mit mineralischer Düngung (N, P, K, NP, NK, NPK, PK) und organischer Düngung (Stallmist und Jauche) werden dreimal pro Jahr gemäht. Auf den zwei Versuchspartellen „Brache“ wird das Mahdgut entweder jährlich entfernt oder auf der Fläche liegen gelassen.

Ziel der Untersuchung war es, die Einflüsse verschiedener Dünger und Brache auf die Kohlenstoff-Pools in einem typischen Dauergrünlandboden (Braunerde) zu untersuchen.

Folgende Untersuchungen wurden durchgeführt:

Vegetationsaufnahmen zur Feststellung der Artenzusammensetzung der Pflanzenbestände, Ertragsfeststellung und Futteranalysen zur Beurteilung der Futterqualität und der Nährstoffentzüge durch Mahd, Quantifizierung der unterirdischen Phytomasse (0-30 cm Bodentiefe), Bestimmung der Lagerungsdichte in Tiefenstufen-Intervallen bis 30 cm Bodentiefe, umfangreiche Bodenanalysen in zwei Tiefenstufen (0-5 cm, 5-10 cm) und zwei Terminen (19.08.2021 und 13.09.2021). Folgende Parameter wurden analysiert: Ultraschallfraktionierung von 4 Fraktionen, Korngrößenanalyse, Ultraschall-Boden-Aggregatstabilität, Digitalmikroskopische Untersuchung, totaler organischer Kohlenstoff und Stickstoff, Gesamt-Phosphor, Oxalat-extrahierbares Eisen, Aluminium und Mangan, mikrobielle Biomasse, Kohlenstoff, Stickstoff und Phosphor in der mikrobiellen Biomasse, Aminosucker, verschiedene Enzyme (Cellulase, Glucosidase, Chitinase, Phosphatase, Protease).

Die Ergebnisse sind in der Masterarbeit von Sebastian Wieser zusammengefasst. Sebastian Wieser (2022): Einflüsse organischer und mineralischer Dünger auf verschiedene Kohlenstoff-Pools des Bodens im Dauergrünland. Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, 115 S. Die Ergebnisse werden im Jahr 2023 in einer internationalen Zeitschrift publiziert.

WP Wald

Der erste Schritt war eine ausführliche *Literatur-Recherche*, die als internationale Kooperation durchgeführt wurde. Darin wurde auf breiter Basis dargestellt, welche Erwartungen überhaupt an Wald-Böden geknüpft werden (Mayer et al. 2020).

Monitoring-Programme: Es standen insgesamt 139 Standorte zur Verfügung, die erstmals im Jahr 1989 untersucht worden sind und die im Jahr 2009 erneut beprobt wurden. In den 20 Jahren zwischen den Untersuchungen haben sich Änderungen des Personals (Gelände, Labor), der Labortechnik, und des Beprobungsprotokolls ergeben. Die Daten der beiden Erhebungen wurden daher zuerst harmonisiert und dann statistisch ausgewertet. Die Methodik ist in Jandl et al. (2022) im Detail beschrieben. Da die Daten der beiden Erhebungen bereits vorlagen, fielen keine Geländearbeiten an.

Der Effekt des Baumartenwechsels wurde anhand der Boden-Monitoring-Daten beschrieben. Die vorhandenen Daten bilden vor allem die Fichtenwälder ab. Bei der Bodenerhebung der Waldbodenzustandsinventur, die Mitte der 1980er Jahre begonnen wurde, war die Zielbaumart der forstlichen Planung immer noch die Fichte. Die Mischwälder sind in dem Datensatz unterrepräsentiert und für keine einzige Laubbaumart (Buche, Eiche, Esche) kommt ein Stichprobenumfang zustande, der belastbare Ergebnisse liefern würde. Daher konnte nur in Nadelwälder und laubholzreiche Mischwälder stratifiziert werden (Jandl et al. 2021).

Zur Beurteilung des Effektes der Bestandesdichte auf den Bodenkohlenstoffvorrat wurde auf die Waldbau-Versuchsflächen des BFW zurückgegriffen. Die Versuchsstandorte in Ottenstein wurden vor etwa 30 Jahren angelegt und im Rahmen von CASAS erstmals bodenkundlich beprobt (Schindlbacher et al 2022). Der Standort Hauersteig wurde vor 70 Jahren als Versuch angelegt und im Rahmen von CASAS erstmals bodenkundlich analysiert. Die Bodenproben wurden im Labor des BFW chemisch analysiert und statistisch ausgewertet. Der Versuch Helfenberg wurde Mitte der 1960er Jahre angelegt. Die erste qualitativ hochstehende Bodenbeprobung fand im Zuge von CASAS statt.

Die Simulation des Bodenkohlenstoffvorrates im Wirtschaftswald und im Schutzwald außer Ertrag wurde mit dem Modell Yasso20 (<https://en.ilmatieteenlaitos.fi/yasso-description>) auf Grundlage der Daten der Österreichischen Waldinventur durchgeführt. Zur Validierung der Ergebnisse für den Wirtschaftswald lagen Referenzwerte der Bodenzustandsinventur vor; die Ergebnisse für den Schutzwald außer Ertrag konnten mangels Geländedaten nicht validiert werden.

WP Wirtschaftliche Effekte

In Bezug auf die SCS-Maßnahmen im Ackerland handelt es sich bei der Position „Kompost aus Abfallanlagen“ um einen zusätzlichen Eintrag von Kohlenstoff im

Boden und es liegt keine Verlagerung von Kohlenstoff aus anderen Bereichen vor. Dieser mögliche zusätzliche Eintrag könnte aus einer verbesserten getrennten Sammlung und Verwertung von Biomasse in Abfallanlagen resultieren und folgt hier dem „best-practice“-Beispiel Vorarlberg, wo die Sammelmenge pro Kopf am höchsten in Österreich ist. Diese SCS-Maßnahme stellt somit einen intersektoralen Ansatz dar und wurde anhand einer Expertenschätzung aus der Abfallwirtschaft berechnet. Demnach könnten aus einer österreichweiten verbesserten Sammlung pro Jahr ca. 88.000 t zusätzlicher Kompost produziert werden. Bei einem Austrag von ca. 8 t Kompost je ha könnte eine Fläche von 11.000 ha mit diesem Kompost bewirtschaftet werden. Aufgrund möglicher Friktionen bei der Sammlung etc. wird im „4-Promille“-Szenario mit einer Fläche in Höhe von 5.500 ha kalkuliert. Es ist anzumerken, dass die Nachfrage nach zusätzlich gesammelter Biomasse aus Haushalten ebenfalls aus anderen Branchen, z.B. der Biogasbranche, zu erwarten ist.

Für die Quantifizierung der volkswirtschaftlichen Effekte des spezifizierten „4-Promille“-Szenarios kommt das Modell ADAGIO („A Dynamic Global Input-Output Model for the EU27“) zur Anwendung. ADAGIO ist ein ökonometrisches Input-Output-Modell der EU27 plus 15 weiterer Staaten (Australien, Brasilien, China, Grossbritannien, Indien, Indonesien, Japan, Kanada, Korea, Norwegen, Russland, Schweiz, Taiwan, Türkei, USA). Kern des Modells sind Aufkommens- und Verwendungstabellen nach 64 Sektoren bzw. Güter (2-Steller nach NACE Rev.2; für Österreich sind die umfassenderen Aufkommens- und Verwendungstabellen der Statistik Austria implementiert, die 74 Güter und Sektoren unterscheiden) sowie 6 Endnachfragekategorien (privater Konsum, öffentlicher Konsum, private Dienste ohne Erwerbscharakter, Investition, Lagerveränderungen sowie Exporte), sowie eine Handelsmatrix, die die Modellregionen auf Güterebene verbindet. Basisjahr des Modells ist 2014, das aktuellste Jahr, für das eine interregionale IO-Tabelle verfügbar ist (Kratena et al. 2017). Wesentliche Verhaltensgleichungen sind ökonometrisch geschätzt: Die Faktornachfrage in der Produktion wird gemeinsam mit den Outputpreisen über ein Translog-Modell determiniert; die Lohnsetzung folgt einem wage-bargaining-Ansatz. In der privaten Konsumnachfrage werden 2 dauerhafte (Fahrzeuge, Wohnraum) und 13 nicht-dauerhafte Konsumgütern unterschieden (die in einem quadratischen AIDS-Modell bestimmt werden). Die Exportströme der 64 Gütern sind zum Teil modellendogen (aus den gespiegelten Importen der anderen Modell-Regionen), zum anderen sind sie modellexogen (Exporte in den im Modell nicht abgedeckten „Rest der Welt“).

Kurzbeschreibung des Modells ADAGIO

ADAGIO („A Dynamic Global Input-Output Model for the EU27“) ist ein ökonometrisches Input-Output-Modell der EU28 plus 14 weiterer Staaten (Australien, Brasilien, China, Indien, Indonesien, Japan, Kanada, Korea, Norwegen, Russland, Schweiz, Taiwan, Türkei, USA). Kern des Modells sind Aufkommens- und Verwendungstabellen nach 64 Sektoren bzw. Güter (2-Steller nach NACE Rev.2) sowie 6 Endnachfragekategorien (privater Konsum,

öffentlicher Konsum, private Dienste ohne Erwerbscharakter, Investition, Lagerveränderungen sowie Exporte), sowie eine Handelsmatrix, die die Modellregionen auf Güterebene verbindet. Wesentliche Verhaltensgleichungen sind ökonomisch geschätzt: Die Faktornachfrage in der Produktion wird gemeinsam mit den Outputpreisen über ein Translog-Modell determiniert; die Lohnsetzung folgt einem wage-bargaining-Ansatz. In der privaten Konsumnachfrage werden 2 dauerhafte (Fahrzeuge, Wohnraum) und 13 nicht-dauerhafte Konsumgütern unterschieden (die in einem quadratischen AIDS-Modell bestimmt werden). Die Exportströme der 64 Gütern sind zum Teil modellendogen (aus den gespiegelten Importen der anderen Modell-Regionen), zum anderen sind sie modellexogen (Exporte in den im Modell nicht abgedeckten „Rest der Welt“).

Im privaten wie im öffentliche Konsum ist eine dynamische Vermögensbildung implementiert, wobei im privaten Konsum zusätzlich zwischen 5 Einkommensgruppen (Quintilen) unterschieden wird: vereinfacht dargestellt ergibt die Differenz aus laufenden Einnahmen und Ausgaben die Netto-Verschuldung (bzw. Ersparnis), die gemeinsam mit dem letztjährigen den aktuellen Schulden- bzw. Vermögensstand ergibt; Schulden- bzw. Vermögensstände gehen mit (positiven oder negativen) Zinszahlungen in die laufenden Einnahmen bzw. Ausgaben ein. Zwischen den Gebarungen der privaten und öffentlichen Haushalte bestehen vielfältige Verbindungen – Steuern auf Einkommen und Vermögen oder Sozialversicherungsabgaben fließen von den Haushalten zum Staat; Transferleistungen (Pensionen, Arbeitslosenunterstützung, sonstige Transfers) fließen vom Staat zu den Haushalten. Ähnlich, wenn auch in geringerem Umfang, besteht eine Verbindung zwischen dem Unternehmenssektor und dem Staat (über Produktionssteuern, Subventionen, Körperschaftssteuern etc.).

Eine zusätzliche Eigenschaft, die ADAGIO für Simulationen wie die vorliegende prädestiniert, ist ein konsistenter Preisbildungsmechanismus: ausgehend von den endogenen sektoralen Outputpreisen (die gemeinsam mit den Produktionsfaktoren bestimmt werden) werden die Güterpreise zu Herstellungspreisen („Preis am Fabrikstor“) bestimmt. Zusammen mit Handels- und Transportmargen sowie Gütersteuern (die Mehrwertsteuer sei als nur die wichtigste davon genannt) ergeben sich die Anschaffungspreise (jene Preise, die von den verschiedenen Verbrauchern bezahlt werden). Im Außenhandel setzt sich diese Preistransmission fort: die Exporte, die an der Grenze des exportierenden Landes zu fob-Preisen („free on board“) bewertet sind, werden, nach Beaufschlagung mit internationalen Handels- und Transportspanne, zu cif-bewerteten Importen an der Grenze des Importlandes (cif= „cost, insurance, freight“). Änderungen in (nationalen wie internationalen) Handels- und Transportmargen sowie in den Gütersteuern, zu denen im Außenhandel auch Zölle gehören können, lassen sich somit auf sehr direkte (und treffgenaue) Weise im Modell implementieren.

Kernelemente des Modells sind in Kratena et al., (2017), Kratena und Streicher (2017), ECORYS, WIFO und NIERS (2018) beschrieben. Die Arbeiten an den Datengrundlagen sind in Timmer, et al. (2015), Streicher und Stehrer (2015) dokumentiert. Beispielhafte Anwendungen des Modells finden sich in Swart et al. (2016) sowie Schmid et al. (2016).

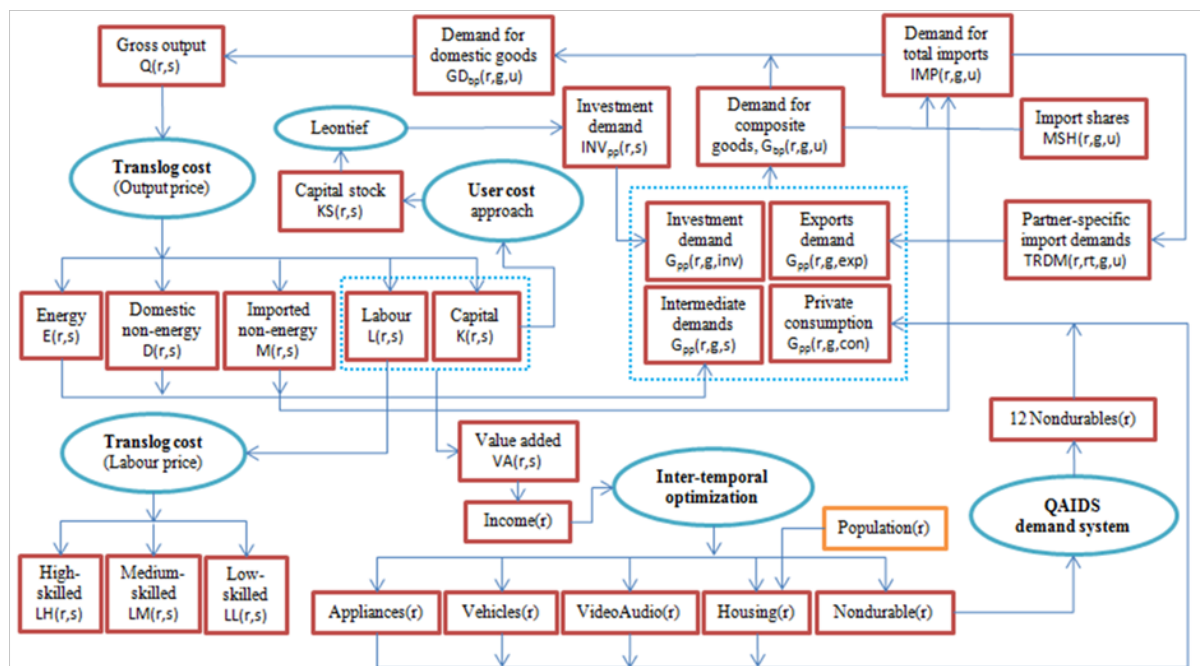


Abbildung 17: Modellstruktur ADAGIO

Q: WIFO, IPTS (The Institute for Prospective Technological Studies)

Literatur im Methoden- und Ergebnisteil

Amelung, W., Bossio, D., de Vries, W., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Amundson, R., Bol, R., Collins, C., Lal, R., Leifeld, J., Minasny, B., Pan, G., Paustian, K., Rumpel, C., Sanderman, J., van Groenigen, J. W., Mooney, S., van Wese-mael, B., Wander, M., & A. Chabbi (2020). Towards a global-scale soil climate mitigation strategy. *Nature Communications*, 5427 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>.

Baumgarten, A., Haslmayr, H.-P., Schwarz, M., Huber, S., Weiss, P., Obersteiner, E., Aust, G., Englisch, M., Horvath, D., Leitgeb, E., Foldal, C., Rodlauer, C., Bohner, A., Spiegel, H., & Jandl, R. (2021). Organic soil carbon in Austria – Status quo and foreseeable trends. *Geoderma*, 402. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115214>.

BML (2022): Moorstrategie Österreich 2030+. Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Wien.

Bruni, E., Guenet, B., Huang, Y., Clivot, H., Virto, I., Farina, R., Kätterer, T., Ciais, P., Martin, M., and Chenu, C. (2021). Additional carbon inputs to reach a 4 per 1000 objective in Europe: feasibility and projected impacts of climate change

based on Century simulations of long-term arable experiments, *Biogeosciences* 18, 3981-4004.

Bruni, E., Chenu, C., Abramoff, R. Z., Baldoni, G., Barkusky, D., Clivot, H., Huang, Y., Kätterer, T., Pikuła, D., Spiegel, H., Virto, I., and Guenet, B. (2022). Multi-modelling predictions show high uncertainty of required carbon input changes to reach a 4‰ target, *European Journal of Soil Science* 73.

Dersch, G., Böhm, K. Effects of agronomic practices on the soil carbon storage potential in arable farming in Austria (2001). *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60, 49–55. <https://doi.org/10.1023/A:1012607112247>

Dersch, G. (2019). Schwerpunkt 4C, 5D, 5E. Evaluierung des Österreichischen Agrar-Umweltprogramms ÖPUL – Nationaler Detailbericht 2019. Im Rahmen der begleitenden Evaluierung des Ländlichen Entwicklungsprogramms 2014-2020. Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wien.

de Swart, L, Gille, J., Streicher, G., Schönfelder, S., Troskiy, F., (2016). Danube+20: More Jobs Due to Better Inland Water Transport?. *Transportation Research Procedia*. 14. 163-172. 10.1016 / j.trpro.2016.05.052.

ECORYS, WIFO und NIESR (National Institute of Economic and Social Research) (2018). Competitiveness of the European cement and lime sectors. Report for the Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs (European Commission). Contribution G. STREICHER: Modelling chapter; <https://publications.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/07d18924-07ce-11e8-b8f5-01aa75ed71a1/language-en/format-PDF/source-65040600>

FAO (2020). A protocol for measurement, monitoring, reporting and verification of soil organic carbon in agricultural landscapes – GSOC-MRV Protocol. Rome. <https://doi.org/10.4060/cb0509en>

Jandl, R.; Ledermann, T.; Kindermann, G. & Weiss, P. (2021). Soil Organic Carbon Stocks in Mixed-Deciduous and Coniferous Forests in Austria *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 69. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.688851>

Klik, A., and Rosner, J. (2020) Long-term experience with conservation tillage practices in Austria: Impacts on soil erosion processes, *Soil and Tillage Research* 203.

Kratena, K., Streicher, G., Salotti, S., Sommer, M., Valderas Jaramillo, J. M. (2017). FIDELIO 2: Overview and theoretical foundations of the second version of the Fully Interregional Dynamic Econometric Long-term Input-Output model for the EU-27, Publications Office of the European Union 2017.

Kratena, K., G. Streicher (2017). Fiscal Policy Multipliers and Spillovers in a Multi-Regional Macroeconomic Input-Output Model, WIFO Working Papers, 2017

Mayer, M.; Prescott, C. E.; Abaker, W. E.; Augusto, L.; Cécillon, L.; Ferreira, G. W.; James, J.; Jandl, R.; Katzensteiner, K.; Laclau, J.-P.; Laganière, J.; Nouvellon, Y.; Paré, D.; Stanturf, J. A.; Vanguelova, E. I. & Vesterdal, L. (2020).

Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 466, 118127.

Meyer, I., Markytan, S. (2022). Faktencheck Klimawandel, Landwirtschaft, Ernährung, WIFO-Studie, März 2022, 105 Seiten, https://www.wifo.ac.at/publikationen/publikationssuche?detail-view=yes&publikation_id=69435

Ledermann, T.; Braun, M.; Kindermann, G.; Jandl, R.; Ludvig, A.; Schadauer, K.; Schwarzbauer, P. & Weiss, P (2022). Effects of Silvicultural Adaptation Measures on Carbon Stock of Austrian Forests. *Forests*, 13.

Paul, C., Bartkowski, B., Donmez, C., Don, A., Mayer, S., Steffens, M., Weigl, S., Wiesmeier, M., Wolf, A., and Helming, K. (2023). Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? *J Environ Manage* 330, 117142.

Poeplau, C., Bolinder, M. A., Eriksson, J., Lundblad, M., and Kätterer, T. (2015). Positive trends in organic carbon storage in Swedish agricultural soils due to unexpected socio-economic drivers, *Biogeosciences* 12, 3241-3251.

Qiao, L., Wang, X., Smith P., Fan J., Lu, Y., Emmett, B., Li, R., Dorling, St., Chen, H., Liu, S., Benton, T.G., Wang, Y., Ma, Y., Jiang, R., Zhang, F., Piao, S., Müller, Ch., Yang, H., Hao, Y., Li, W., & Fan, M. (2022). Soil quality both increases crop production and improves resilience to climate change. *Nature Climate Change*, 12(574), 574-580. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01376-8>

Sandén, T., Spiegel, H., Stüger, H.-P. Schlatter, N., Haslmayr, H.-P., Zavattaro, L., Grignani, C., Bechini, L., D´Hose, T., Molendijk, L., Pecio, A., Jarosz, Z., Guzmán, G., Vanderlinden, K., Giráldez, J.V., Mallast, J., ten Berge, H. (2018). European long-term field experiments: knowledge gained about alternative management practices. *Soil Use and Management* (doi:10.1111/sum.12421).

Schmid, E., M. Kirchner, D. Leclere, G. Streicher, F. Schipfer, J. Schmidt, L. Kranzl, A. Depper-mann, P. Havlik, M. Schönhart, (2016). Vulnerability of a bio-based economy to global climate change impacts (CC2BBE) (Final Report No. KR12AC5K01355).

Sinabell, F. und G. Streicher, (2021). Holz im Bau und als Rohstoff für Kraftstoffe. Szenarien für die österreichische Volkswirtschaft. Monographien, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, Wien. Online available at: <https://www.wifo.ac.at/wwa/pubid/66985>

Smith, P., Calvin K, Nkem J, et al. (2020). Which practices co-deliver food security, climate change mitigation and adaptation, and combat land degradation and desertification? *Global Change Biology*, 26, 1532-1575. <https://doi.org/10.1111/gcb.14878>.

Streicher, G.,R. Stehrer (2015). Whither Panama? Constructing a consistent and balanced world SUT system including international trade and transport margins; Economic Systems Research, Vol 27/2 (2015), p 213-237

Tang, K., Kragt, M. E., Hailu, A., & Ma, C. (2016). Carbon farming economics: What have we learned? Journal of Environmental Management, 172, 49-57. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.008>.

Tatzber, M., Stemmer, M., Spiegel, H., Katzberger, C., Zehetner, F., Haberhauer, G., Garcia-Garcia, E., and Gerzabek, M. H. (2009). Spectroscopic behaviour of 14C-labeled humic acids in a long-term field experiment with three cropping systems, Soil Research 47, 459-469.

Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R. and de Vries, G. J. (2015). "An Illustrated User Guide to the World Input–Output Database: the Case of Global Automotive Production", Review of International Economics, 23: 575–605

Wenzel, W. W., Duboc, O., Golestanifard, A., Holzinger, C., Mayr, K., Reiter, J., and Schiefer, A. (2022). Soil and land use factors control organic carbon status and accumulation in agricultural soils of Lower Austria, Geoderma 409.

7 Arbeits- und Zeitplan

(max. 1 Seite)

Kurze Übersichtsdarstellung des Arbeits- und Zeitplans (01.09.2019-31.12.2022).

Tasks	1st project year				2nd project year				3rd project year				4th project year
	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I
Coordination (contract; Day-to-day + internal meeting; financial, technical reports (WP 1)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Cropland: literature research, guidelines, publications (WP 2)		■	■	■			■	■				■	■
Cropland: Sample collection, analysis (WP2)			■	■			■	■					
Cropland: Existing and new data evaluation and interpretation (WP 2)		■	■		■				■				■
Grassland: Literature research, guidelines, Publications (WP 3)			■	■			■	■				■	■
Grassland: Sample collection, analysis (WP3)					■	■							

Grassland: Existing and new data evaluation and interpretation (WP 3)												
Forestry: literature research, guidelines, publications (WP 4)												
Forestry: Sample collection, analysis (WP4)												
Forestry: Existing and new data evaluation and interpretation (WP 4)												
Economy: Project management; stakeholder workshop, scenario construction (WP 5)												
Economy: Quantification costs and benefits; co-benefits assessment; macroeconomic effects (WP 5)												
Economy: Policy recommendations; publications (WP 5)												
Outreach, communication and Dissemination e.g. scientific abstracts, folder, SDG publication preparation (WP 6)												
Stakeholder engagement incl. Workshops (WP 6)												

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Tabellarische Angabe von wissenschaftlichen Publikationen, die aus dem Projekt entstanden sind, sowie sonstiger relevanter Disseminierungsaktivitäten.

Publikationen:

Baumgarten, A.; Haslmayr, H.-P.; Schwarz, M.; Huber, S.; Weiss, P.; Obersteiner, E.; Aust, G.; Englisch, M.; Horvath, D.; Leitgeb, E.; Foldal, C.; Rodlauer, C.; Bohner, A.; Spiegel, H. & Jandl, R.: Organic soil carbon in Austria – Status quo and foreseeable trends *Geoderma*, 2021, 402, 115214
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115214>

Bohner, A. Grenzen des Humusaufbau im Dauergrünland. In *Grünlandprofi* 1/2022, pp 8-9. <https://blickinsland.at/ausgaben/012022-gruenlandprofi/>

Hendricks, S; Zechmeister-Boltenstern, S; Kandeler, E; Sanden, T; Diaz-Pines, E; Schnecker, J; Alber, O; Miloczki, J; Spiegel, H. 2022. Agricultural

management affects active carbon and nitrogen mineralisation potential in soils. *J Plan Nutr Soil Sci*, 185 (4) <https://doi.org/10.1002/jpln.202100130>

Jandl, R.; Ledermann, T.; Kindermann, G. & Weiss, P.: Soil Organic Carbon Stocks in Mixed-Deciduous and Coniferous Forests in Austria *Frontiers in Forests and Global Change*, 2021, 4, 69. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2021.688851>

Jandl, R.; Leitgeb, E.; Englisch, M. 2022. Decadal Changes of Organic Carbon, Nitrogen, and Acidity of Austrian Forest Soils. *Soil. Syst.* 2022, 6, 28. <https://doi.org/10.3390/soilsystems6010028>

Ledermann, T.; Braun, M.; Kindermann, G.; Jandl, R.; Ludvig, A.; Schadauer, K.; Schwarzbauer, P. & Weiss, P. Effects of Silvicultural Adaptation Measures on Carbon Stock of Austrian Forests. *Forests*, 2022, 13 (*diese Publikation ist kein Ergebnis von CASAS, unterstützt aber die getroffenen Aussagen*)

Mayer, M.; Prescott, C. E.; Abaker, W. E.; Augusto, L.; Cécillon, L.; Ferreira, G. W.; James, J.; Jandl, R.; Katzensteiner, K.; Laclau, J.-P.; Laganière, J.; Nouvellon, Y.; Paré, D.; Stanturf, J. A.; Vanguelova, E. I. & Vesterdal, L. Influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: A knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466, 118127

Meyer Ina, Franz Sinabell, Gerhard Streicher, Adelheid Spiegel, Andreas Bohner, (im Erscheinen, März 2023): Kohlenstoffsequestrierung in Österreichs Acker- und Grünlandböden: Bedeutung und ökonomische Effekte ausgewählter Maßnahmen, *WIFO-Monatsberichte*, 96, 3.

Schindlbacher, A.; Mayer, M.; Jandl, R.; Zimmermann, S. & Hagedorn, F. 2022. Optimizing forest management for soil carbon sequestration. In (Rumpel, C. Ed) *Understanding and fostering soil carbon sequestration*, Burleigh Dodds Science Publishing.

Tiefenbacher, A., Sandén, T., Haslmayr, H.-P., Miloczki, J., Wenzel, W., and Spiegel, H. (2021) Optimizing Carbon Sequestration in Croplands: A Synthesis, *Agronomy* 11. <https://doi.org/10.3390/agronomy11050882>

Disseminierungsaktivitäten:

- Flyer CASAS Projekt
- EJP Soil Infotag "Boden => Klima => Zukunft". CASAS Teilnahme.
- März 2021: EJP SOIL Annual Science Days: breakout sessions "CarboSeq": Management options, potential and limits for Carbon Sequestration in Austrian Soils (Heide Spiegel, Alexandra Tiefenbacher, Julia Miloczki, Taru Sandén, Andreas Bohner, Robert Jandl, Ina Meyer, Sigbert Huber, Eugenio Diaz-Pines, Sophie Zechmeister-Boltenstern)
- Mai 2021. Bodenforum Österreich: CASAS Vorstellung
- August, 2021. European Confederation of Soil Science Societies, Eurosoil 2021 (EUROSOIL 2021). Geneva, Switzerland: Management options, potential and limits for carbon sequestration in Austrian soils. Spiegel, H; Wawra, A; Miloczki, J; Sandén, T; Bohner, A; Jandl, R; Meyer, I; Huber, S;

Díaz-Pinés, E; Zechmeister-Boltenstern, S. <https://b-com.mci-group.com/Abstract/Statistics/AbstractStatisticsViewPage.aspx?AbstractID=484513>

- Juni 2021 ÖBG Tagung. CASAS Teilnahme
- Klimatag 2021 (online). Kohlenstoffspeicherung in Österreichischen Böden - Möglichkeiten, Grenzen, und Bewirtschaftungsstrategien (CASAS) Heide Spiegel, Andreas Baumgarten, Andreas Bohner, Robert Jandl, Ina Meyer, Franz Sinabell, Sigbert Huber, Barbara Birli, Sophie Zechmeister-Boltenstern, Eugenio Diaz-Pines, Taru Sandén.
- April 2022. Policy Workshop EJP SOIL. EU-Bodenstrategie und andere neue Politik-Instrumente. Erwartungen und Anforderungen an Politik und Wissenschaft in Österreich. CASAS Teilnahme
- Mai 2022, European Geosciences Union (EGU), EGU General Assembly. Spiegel, H; Hendricks, S; Zechmeister-Boltenstern, S; Kandeler, E; Diaz-Pines, E; Schneckner, J; Alber, O; Miloczki, J; Sandén, T: Agricultural management affects active carbon and nitrogen mineralisation potential in soils. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu22-5811>
- August 2022. World Congress of Soil Science Glasgow: Current and future SOC sequestration management measures in Austrian agriculture. Heide Spiegel, Julia Miloczki, Taru Sandén, Georg Dersch, Andreas Bohner, Robert Jandl, Ina Meyer, Franz Sinabell, Sigbert Huber, Eugenio Diaz-Pines, Julia Fohrafellner, Sophie Zechmeister-Boltenstern.
- September 2022: Annual Meeting of the Austrian Soil Science Society ("Soil Health and Carbon Farming"). "Carbon Sequestration in Austrian Soils – Selected results of the CASAS project – Heide Spiegel, Andreas Baumgarten, Andreas Bohner, Robert Jandl, Ina Meyer, Franz Sinabell, Sigbert Huber, Barbara Birli, Sophie Zechmeister-Boltenstern, Eugenio Diaz-Pines, Taru Sandén.
- September 2022: Annual Meeting of the Austrian Soil Science Society ("Soil Health and Carbon Farming"): Undisturbed soil core incubations: Assessing trade-offs between C sequestration and greenhouse gas fluxes of long-term agricultural management in Europe. Ulises Esparza-Robles; Sophie Zechmeister-Boltenstern; Eugenio Díaz-Pinés.

Disseminierungsaktivitäten/Organisation von Workshops

- 17.04.2020: Worldcafé zum Thema Klimawandelanpassung durch die Landwirtschaft, den Konsumenten und die Politik
- 11.09.2020. Stakeholder Workshop AGES: World Café Veranstaltung
 - Welche Maßnahmen werden von den Konsumenten ergriffen?
 - Klimawandel und Anpassungsstrategien in der österreichischen Landwirtschaft – Neue Ergebnisse aus der Forschung"
- 26.9.2020: SERENA + MINOTAUR + CASAS ++ Stakeholder-Workshop Tag

- 24.02.2021. Stakeholder-Workshop „Humusaufbau im Dauergrünland“, AREC Raumberg-Gumpenstein (online)
- 14.12. WIFO-Workshop (online). Forestry experts were invited to analyse 2030, 2035 and 2040 targets and develop an understanding and a dialogue on solutions.
- 02.05.2022. Stakeholder-Workshop WIFO
- 7.11.2022. Economic assessment workshop at WIFO
- 5.12.2022. Closing workshop CASAS Project (BOKU, Vienna). 60 Teilnehmer (40 in Präsenz, 20 online). Programm:
 - Keynote – Carbon Farming. Andrea Spanischberger, BML
 - Bodenkohlenstoffsequestrierung im Acker. Heide Spiegel, AGES
 - Bodenkohlenstoffsequestrierung im Dauergrünland. Andreas Bohner, HBLFA Gumpenstein
 - Bodenkohlenstoffsequestrierung im Wald. Robert Jandl, BFW
 - Keynote – Bodenkohlenstoff-Sequestrierung unter Bodenschutzanlagen im Flach- und Hügelland. Walter Wenzel, BOKU
 - Ökonomische Aspekte der Kohlenstoffsequestrierung. Ina Meyer, WIFO
 - Bodenkohlenstoffsequestrierung und die SDGs. Eugenio Diaz-Pines, BOKU

Masterarbeiten innerhalb des Projektes:

Philipp de Jong (2021): Promoting soil organic carbon accumulation by optimizing management: Findings on potentials and limitations from long-term field experiments. Master Thesis 2021. BOKU and University of Ghent. <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:003013842>

Sebastian Wieser (2022): Einflüsse organischer und mineralischer Dünger auf verschiedene Kohlenstoff-Pools des Bodens im Dauergrünland. Masterarbeit an der Universität für Bodenkultur Wien, 115 S.

Nazerke Amangeldy (2022): Effect of crop residue management on soil greenhouse gas fluxes in an Austrian long-term experiment. Master Thesis 2022. BOKU and University of Ghent. <https://lib.ugent.be/catalog/rug01:003065276>

ANNEX

Tabelle 4:

Relative C-Vorratsänderungen und SOC Sequestrierungspotenziale ($\text{kg C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$) in 0-20/35 cm durch unterschiedliche ackerbauliche Bodenbewirtschaftung aus regionalen österreichischen Erhebungen

Bundesland	Bodentiefe cm	Zeitraum	Jahre	relative C Vorrats-Änderungen (SOC Vorräte optimierte Bewirtschaftung/SOC Vorräte Kontrolle)	SOC Sequestrierungspotenziale ($\text{kg C ha}^{-1}\text{yr}^{-1}$)	Ausgangswerte (Corg Vorräte t ha^{-1})	4Promille-Ziel (Corg t ha^{-1})	Bewirtschaftungsmaßnahmen	Quelle	4 Promille Ziel erreicht : unter Berücksichtigung der Anfangs-Vorräte (wenn vorhanden)
NÖ	0-20	1990/92-2015/20	max. 30		200			Verbot des Strohabbrennens, ÖPUL Maßnahmen: reduzierte Bodenbearbeitung, Zwischenfrüchte,	Wenzel et. al, 2022	
NÖ	0-35	1970-2020	ca. 50		560			"BodenLeben Landwirte": weite Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte mit vielen Mischungspartnern, Minimalbodenbearbeitung, organische Düngung	Rosinger et al., 2022	
NÖ Marchfeld	0-20	1991/1995 - 2015/2017	ca. 25		188	42	46,2		Dersch, 2019; ÖPUL Evaluierung	ja

NÖ Tullnerfeld	0-20	1991/1995 - 2015/2017	ca. 25		312	36	39,6		Dersch, 2019; ÖPUL Evaluierung	ja
OÖ Traun-Ennsplatte	0-20	1991/1995 - 2015/2017	ca. 25		108	45	49,5		Dersch, 2019; ÖPUL Evaluierung	nein
NÖ Weinviertel	0-30	1994-2013	19	0,94	-163			Minimalbodenbearbeitung verglichen mit konventioneller Pflugbearbeitung Mistelbach	Klik und Rosner, 2021	
NÖ Weinviertel	0-30	1994-2013	19	0,99	-32			No Tillage verglichen mit konventioneller Pflugbearbeitung Mistelbach	Klik und Rosner, 2021	
NÖ Tullnerfeld	0-30	1997-2013	16	1,31	838			Minimalbodenbearbeitung verglichen mit konventioneller Pflugbearbeitung Pixendorf	Klik und Rosner, 2021	
NÖ Tullnerfeld	0-30	1997-2013	16	1,40	1094			No Tillage verglichen mit konventioneller Pflugbearbeitung Pixendorf	Klik und Rosner, 2021	
NÖ Mostviertel	0-30	1994-2013	19	1,04	121			Minimalbodenbearbeitung verglichen mit konventioneller Pflugbearbeitung Pyhra	Klik und Rosner, 2021	
NÖ Mostviertel	0-30	1994-2013	19	1,03	68			No Tillage verglichen mit konventioneller Pflugbearbeitung Pyhra	Klik und Rosner, 2021	
NÖ Marchfeld	0-30	1997-2020	23	1,11	446			No Tillage verglichen mit konventioneller Pflugbearbeitung Raasdorf	Neugschwandtner, 2014 und Liebhard, 2022	

NÖ Marchfeld	0-30	1997-2020	23	1,05	201			Reduced tillage (cultivator) verglichen mit konventioneller Pflugbearbeitung Raasdorf	Neugschwandtner, 2014 und Liebhard, 2022	
NÖ Marchfeld	0-30	1988-2020	32	1,22	157	26	29,2	Minimalbodenbearbeitung (Frässaat) verglichen mit konventioneller Pflugbewirtschaftung Fuchsenbigl	Bodenbearbeitungsversuch Fuchsenbigl, CASAS Analysen	nein
NÖ Marchfeld	0-30	1988-2020	32	1,13	97	26	29,2	Reduzierte Bodenbearbeitung (Grubber) verglichen mit Pflugbewirtschaftung Fuchsenbigl	Bodenbearbeitungsversuch Fuchsenbigl, CASAS Analysen	nein
NÖ Alpenvorland	0-25	1959-1995	36	1,03	56			Optimale mineralische N-Düngung verglichen mit unterlassener N-Düngung	Dersch und Böhm (2001)	
NÖ Waldviertel	0-25	1959-1995	36	1,02	17			Optimale mineralische N-Düngung verglichen mit unterlassener N-Düngung	Dersch und Böhm, 2001	
NÖ Marchfeld	0-25	1959-1995	36	1,08	106			Optimale mineralische N-Düngung verglichen mit unterlassener N-Düngung	Dersch und Böhm, 2001	
NÖ Marchfeld	0-25	1982-2021	39	1,04	63	63	72,7	Einarbeitung der Ernterückstände verglichen mit der Abfuhr	AGES Feldversuch Marchfeld; CASAS Analysen	nein
NÖ Alpenvorland	0-25	1986-2020	34	1,06	58	29	33	Einarbeitung der Ernterückstände verglichen mit der Abfuhr	AGES Feldversuch Alpenvorland; CASAS Analysen	ja

NÖ Alpenvorland	0-25	1974-1995	21	1,05	160	61,5	66,7	Zusätzliche Stallmistdüngung	Dersch und Böhm, 2001	
NÖ Waldviertel	0-25	1974-1996	21	1,21	376	37,7	40,9	Zusätzliche Stallmistdüngung	Dersch und Böhm, 2001	
OÖ Zentralraum Linz	0-25	1991-2018	27	1,16	243	31,4	34,8	Bioabfall-Kompostanwendung (entsprechend 175 kg N ha-1 a-1) verglichen mit N Mineraldüngung	AGES Kompostversuch, CASAS Analysen	ja
	0-25	1991-2019	27	1,32	476	29,8	33,0	Bioabfall-Kompostanwendung (entsprechend 525 kg N ha-1 a-1) verglichen mit N Mineraldüngung	AGES Kompostversuch, CASAS Analysen	ja
Steiermark Wagna	0-30	2007-2022	15	1,08	325	54	57	N Mineraldüngung verglichen mit Nulldüngung	Versuch Schantl Gülldüngung, Wagna	ja
	0-30	2007-2022	15	1,11	445	50	53	Kombination Gülldüngung/ N Mineraldüngung verglichen mit Nulldüngung	Versuch Schantl Gülldüngung, Wagna	ja
	0-30	2007-2022	15	1,13	534	52	55	Gülldüngung verglichen mit Nulldüngung	Versuch Schantl Gülldüngung, Wagna	ja
	0-30	2007-2022	15	1,05	233	52	55	Mineraldüngung verglichen mit Gülldüngung	Versuch Schantl Gülldüngung, Wagna	ja

Steiermark Kalsdorf	0-30	2009-2022	11	1,07	240	47	50	N Mineraldüngung verglichen mit Nulldüngung	Versuch Schantl Gülldüngung, Kalsdorf	ja
	0-30	2009-2022	11	1,07	248	46	49	Kombination Gülldüngung/ N Mineraldüngung verglichen mit Nulldüngung	Versuch Schantl Gülldüngung, Kalsdorf	ja
	0-30	2009-2022	11	1,09	330	45	48	Gülldüngung verglichen mit Nulldüngung	Versuch Schantl Gülldüngung, Kalsdorf	ja
	0-30	2009-2022	11	1,02	75	45	48	Mineraldüngung verglichen mit Gülldüngung	Versuch Schantl Gülldüngung, Kalsdorf	ja
NÖ Marchfeld	0-25	1974-1995	27	0,94	-106	51,7	57	Mit Beregnung/ ohne Beregnung	Dersch und Böhm, 2001	nein

Tabelle 5: AGES Bodenbearbeitungsversuch Fuchsenbigl Bodenuntersuchungsergebnisse 2020:
Minimalbodenbearbeitungsvariante (1), Pflugvariante (2), reduzierte Bodenbearbeitung (3)

Varian- te	Wieder- holung	Tiefe cm	N-total %	N- minerali- sation mg kg ⁻¹ 17d ⁻¹	TOC %	P-CAL mg kg ⁻¹ ₁	K-CAL mg kg ⁻¹ ₁	pH- CaCl ₂	CAO %	C/N	Magnesium Schachtscha- bl mg kg ⁻¹	KMnO ₄ oxidier- barer C mg kg ⁻¹	AC/ TOC %	Dichte 2020 fixe Tiefens- tufen	Corg_Vorrä- te t ha ⁻¹ (BD 2020)
1	1	10	0,227	133,99	2,4	159	389	7,5	9,4	10,6	145	676	2,82	1,16	27,73
1	2	10	0,207	91,85	2,34	83	251	7,59	15,3	11,3	122	608	2,60	1,11	25,96
1	3	10	0,219	77,07	2,15	142	300	7,53	9,8	9,8	148	663	3,08	1,13	24,34
2	1	10	0,167	39,03	1,95	68	145	7,62	14,5	11,7	87	484	2,48	1,18	23,06

2	2	10	0,157	41,76	1,79	88	117	7,65	10,4	11,4	99	473	2,64	1,09	19,47
2	3	10	0,171	35,84	1,84	70	129	7,67	13	10,8	118	491	2,67	1,27	23,35
3	1	10	0,19	90,36	2,07	122	301	7,57	10,6	10,9	134	555	2,68	1,20	24,89
3	2	10	0,162	70,6	1,75	116	230	7,64	12	10,8	104	789	4,51	1,23	21,56
3	3	10	0,182	73,03	1,95	100	249	7,59	13,4	10,7	121	545	2,79	1,21	23,55
1	1	20	0,194	81,46	2,12	109	269	7,58	11,8	10,9	129	554	2,61	1,42	30,15
1	2	20	0,183	57,88	1,96	101	213	7,61	11,8	10,7	115	534	2,72	1,46	28,55
1	3	20	0,183	57,17	1,95	102	234	7,6	11	10,7	144	543	2,78	1,50	29,27
2	1	20	0,169	56,66	1,92	80	155	7,61	12,4	11,4	123	477	2,48	1,23	23,70
2	2	20	0,162	47,38	1,87	85	123	7,65	11,8	11,5	108	505	2,70	1,17	21,82
2	3	20	0,159	37,95	1,79	83	132	7,65	12	11,3	89	485	2,71	1,26	22,61
3	1	20	0,179	73,6	1,95	117	262	7,63	12	10,9	133	534	2,74	1,43	27,95
3	2	20	0,16	53,74	1,81	112	194	7,66	12,2	11,3	106	504	2,78	1,38	24,94
3	3	20	0,168	58,23	1,75	113	244	7,6	11,4	10,4	103	525	3,00	1,37	23,90
1	1	30	0,19	77,76	2,04	97	267	7,59	13	10,7	130	558	2,74	1,31	26,76
1	2	30	0,188	74,87	1,95	97	226	7,61	12,2	10,4	109	552	2,83	1,46	28,39
1	3	30	0,173	49,99	1,81	93	214	7,62	11,2	10,5	145	522	2,88	1,47	26,54
2	1	30	0,169	41,46	1,95	71	147	7,62	11,8	11,5	115	518	2,66	1,28	24,93
2	2	30	0,162	38,99	1,8	87	131	7,64	12,2	11,1	110	497	2,76	1,22	21,92
2	3	30	0,16	36,37	1,75	92	133	7,63	11,2	10,9	102	478	2,73	1,24	21,71
3	1	30	0,17	52,97	1,8	98	236	7,64	11,2	10,6	125	491	2,73	1,28	23,00
3	2	30	0,168	74,65	1,87	108	228	7,65	12,4	11,1	105	534	2,86	1,35	25,31

3	3	30	0,164	53,27	1,72	110	199	7,61	11,2	10,5	105	493	2,87	1,44	24,72
1	1	40	0,178	53,37	1,9	94	218	7,63	11,6	10,7	124	486	2,56	1,30	24,73
1	2	40	0,169	40,21	1,79	75	165	7,65	12	10,6	118	463	2,59	1,32	23,57
1	3	40	0,157	40,33	1,68	83	136	7,69	11,4	10,7	124	425	2,53	1,37	23,08
2	1	40	0,166	44,49	1,91	78	152	7,63	12,8	11,5	120	500	2,62	1,28	24,51
2	2	40	0,155	36,41	1,81	85	129	7,66	13,2	11,7	112	502	2,77	1,27	22,91
2	3	40	0,16	35,99	1,71	89	138	7,65	10,6	10,7	105	501	2,93	1,35	23,05
3	1	40	0,161	33,14	1,71	91	189	7,66	11,2	10,6	117	448	2,62	1,26	21,46
3	2	40	0,156	45,2	1,78	95	158	7,69	13,4	11,4	105	493	2,77	1,24	22,13
3	3	40	0,158	38,79	1,7	94	156	7,66	12,2	10,8	102	448	2,64	1,33	22,63
1	1	60	0,161	28,19	1,8	47	119	7,6	15,7	11,2	114	411	2,28	1,23	22,07
1	2	60	0,155	27,2	1,77	49	100	7,68	15,1	11,4	102	406	2,29	1,28	22,61
1	3	60	0,145	24,22	1,66	44	88	7,75	15,5	11,5	126	366	2,20	1,28	21,33
2	1	60	0,156	24,27	1,85	51	105	7,66	15,7	11,9	122	427	2,31	1,21	22,48
2	2	60	0,15	26,92	1,75	71	112	7,7	14,3	11,7	109	474	2,71	1,25	21,83
2	3	60	0,146	26,09	1,62	75	111	7,69	12,4	11,1	104	426	2,63	1,18	19,16
3	1	60	0,179	47,15	1,74	63	141	7,65	7,2	9,7	124	405	2,33	1,26	21,87
3	2	60	0,134	23,24	1,57	54	90	7,71	15,3	11,7	97	371	2,36	1,24	19,54
3	3	60	0,135	24,55	1,57	56	89	7,7	14,9	11,6	98	344	2,19	1,25	19,58

Bodeninformationssystem BORIS (Cecilie Foldal, BFW)

Das österreichische Bodeninformationssystem BORIS enthält Informationen von mehr als 10.000 Bodenstandorten in Österreich. Der Großteil der Daten stammt aus der Bodenzustandsinventur (BZI), die seit Ende der 1980er Jahre in einem 4x4 km-Raster in allen Bundesländern durchgeführt wird. Hinzu kommen Daten aus der Waldbodeninventur sowie regionale Erhebungen aus verschiedenen Projekten. Die Datenbank wird laufend mit weiteren Messdaten aus aktuellen Projekten ergänzt.

Der Gehalt an organischem Bodenkohlenstoff (SOC) ist ein Faktor des Eintrags und der Abbaurates in Abhängigkeit von Landnutzung, Landmanagement, Klima und Geologie. Bei der Bewertung von mehr als 200 Prädiktoren kommen Vos et al. (2019) zu dem Schluss, dass Landnutzung und Landnutzungsgeschichte die wichtigsten Indikatoren für Veränderungen der Kohlenstoffvorräte im Boden sind. Mehrere Autoren haben Korrelationen zwischen dem SOC-Gehalt und der Bodentextur festgestellt, weshalb der Tongehalt selbst oder das Verhältnis zwischen SOC und Ton häufig als Indikatoren für den SOC-Gehalt (Wiesmeier et al., 2012) und das SOC-Sequestrierungspotenzial (Hassink, 1997; Wenzel et al., 2022; Wiesmeier et al., 2014) verwendet werden.

Wir fragen hier, ob Daten aus BORIS für die Erhebung der Kohlenstoffbindung im Boden genutzt werden können. Des Weiteren untersuchen wir, ob wir in den BZI-Datensätzen eine Korrelation zwischen SOC und Tongehalt finden, um die Veränderungen des SOC-Gehalts in Acker- und Grünlandböden im Laufe der Zeit zu quantifizieren.

Methoden:

Mit Hilfe des offiziellen BORIS-Anwendungstools 'Cadenza Web' haben wir in mehreren Erhebungen Bodeninformationen abgerufen. Aufgrund der begrenzten Ressourcen werden nur vier Datensätze vorgestellt. Darüber hinaus haben wir die Abfrage auf Standortparameter (Höhe, Neigung, Exposition), Bodentextur, pH-Wert und Humus- oder Kohlenstoffgehalt sowie auf einige der wichtigsten Nährstoffe wie Stickstoff oder Kalium usw. beschränkt.

Alle Daten wurden gesichtet, und um die Ergebnisse der verschiedenen Erhebungen vergleichen zu können, haben wir

- 1) die verwendeten Messmethoden verglichen und
 - a. Daten ausgeschlossen, bei denen Angaben zur Textur (oder zum Kohlenstoffgehalt des Bodens) fehlten
- 2) korrigierten, konvertierten oder aufsummierten die Daten aus einzelnen Datensätzen wie folgt:
 - a. Humus- oder Kohlenstoffmessungen, bei denen der Gesamtkohlenstoffgehalt berechnet wurde, mussten um den anorganischen Kohlenstoff korrigiert werden (ausgenommen Proben, bei denen kein spezifischer CaCO₃-Gehalt angegeben war)

- b. SOC = Humusgehalt * 0,58
- c. Texturklasse Schluff und Sand, aufaddiert durch feine, mittlere und grobe Fraktionen

Die Analyse ergab, dass das BORIS (heute) keine replizierten Daten enthält. Um Veränderungen des SOC-Gehalts im Laufe der Zeit zu erfassen, wurde daher ein Datensatz des Amtes der Steiermärkischen Landesregierung mit wiederholten BZI-Oberbodenproben zusammengestellt. Auch in diesem Datensatz haben wir den Humusgehalt in SOC umgerechnet und uns auf Standorte konzentriert, die nach 10 Jahren mindestens einmal wiederholt beprobt sind. Aufgrund der Änderung der Probenahmemethodik berücksichtigten wir außerdem nur Standorte mit einer Beprobungstiefe von ≤ 5 cm im Grünland und ≤ 20 cm im Ackerland. Der Datensatz ließ keine Anpassung der Analysemethoden (z. B. Bestimmung des SOC-Gehalts) erkennen. Die relativen mittleren Änderungen des SOC im Laufe der Zeit wurden wie folgt berechnet:

$$\text{Mittlere SOC Änderung im Jahr in \%} = \frac{\left(\frac{(MW\ SOC_{T2} - MW\ SOC_{T1}) * 100}{MW\ SOC_{T1}} \right)}{\text{Jahre zwischen T1 und T2}}$$

wo MW = Mittelwert und T1 = die erste und T2 = die darauffolgende Beprobung bedeutet.

Die Berechnungen, Statistiken (deskriptive Statistiken und Pearson-Korrelationen) und Abbildungen wurden in R Version 4.0.3 von 2020 berechnet.

Ergebnisse und Diskussion:

BZI Daten

Im Burgenland und in Niederösterreich bestehen die Datensätze hauptsächlich aus Ackerflächen, während in Salzburg, Kärnten, Oberösterreich und der Steiermark Grünlandstandorte überwiegen. In den BORIS-Datensätzen sind jedoch auch andere Landnutzungstypen wie Wald, Weinbau, Almwirtschaft und sonstige Landnutzung enthalten. Wie Gerzabek et al. (2005) hervorheben, wurden (und werden) bei den Erhebungen unterschiedliche Methoden zur Messung des SOC's angewandt. Außerdem gibt es unterschiedliche Ansätze für die Probenahme und die Erfassung von Textur und Nährstoffgehalten. Um einen Vergleich zwischen den Regionen oder Datensätzen innerhalb der Regionen zu ermöglichen, müssen die Daten harmonisiert werden. Tabelle 8 im Appendix gibt einen Überblick über die analysierten BORIS Daten.

In Burgenland sind die mittleren Gehalte an SOC 1,7 % bei Acker- und 2,7 % bei Grünlandböden *Tabelle*. Der maximale Tongehalt ist 62 %, mit einem Mittelwert von 25 % bzw. 29 %. Insgesamt weisen die Böden einen recht hohen Gehalt an feiner Textur auf 71% Schluff und Ton. Wie in *Tabelle* aufgeführt, konnten wir keine Korrelationen zwischen dem Gehalt an SOC im Boden und der Textur oder der Bodenchemie feststellen. Es besteht jedoch eine signifikante Korrelation ($p > 0,01$) zwischen dem SOC des Bodens und den Ton+Schluff-Anteil ($r_p = 0,25$) unter den Grünlandstandorten.

In Oberösterreich sind die mittleren Gehalte an SOC 1,2 % bzw. 3,2 % in Acker- und Grünlandböden jeweils. Im Durchschnitt sind die Böden im Vergleich zum Burgenland oder Salzburg weniger tonhaltig, allerdings liegt der mittlere Anteil der Feintextur (Schluff und Ton) aufgrund des hohen Schluffgehalts bei 68,1 %. Ein höherer Tongehalt korreliert in den Ackerböden negativ mit dem Gehalt an Bodenkohlenstoff ($r_p = -0,29$) und mit dem Anteil Ton+Schluff ($r_p = -0,11$), in den Grünlandböden gibt es eine positive Korrelation zwischen dem SOC und dem Ton+Schluff-Anteil ($r_p = 0,25$; unterschiedliche Signifikanzgrade, siehe *Tabelle*).

In Salzburg sind die mittleren Gehalte an SOC 1,7% bzw. 2,4% in Acker- und Grünlandböden jeweils. Der Tongehalt erreicht bis zu 86,4 % mit einem Durchschnitt von 40% in Ackerböden und 31,1% in Grünlandböden. Der durchschnittliche Gesamtgehalt an Ton und Schluff beträgt 55,4%. Es besteht kein signifikanter Zusammenhang zwischen dem SOC und dem Ton- bzw. Ton- und Schluffanteil in Ackerböden, während der SOC positiv mit dem Tongehalt in Grünlandböden korreliert ist (*Tabelle* ; *Abbildung 18*).

In der Steiermark sind die mittleren Gehalte an SOC 1,0% und 2,4% in Acker- bzw. Grünlandböden. Der mittlere Tongehalt beträgt 17,3% bzw. 15,0%. Der Gehalt an SOC und Ton ist negativ mit dem Tongehalt von Ackerböden ($r_p = -0,19$) und positiv mit dem Tongehalt von Grünlandböden ($r_p = 0,25$) korreliert.

Tabelle beschreibt die Datensätze nach Gehalt an SOC, Textur und pH-Wert, und *Tabelle* die Korrelationen zwischen SOC, Textur und pH-Wert. *Abbildung 18* zeigt die Korrelation zwischen SOC und Ton in allen Datensätzen für Acker- und Grünlandböden getrennt.

Tabelle 6 Mittlerer, mittlerer und maximaler Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden sowie der Mittelwert des Ton- und Schluffgehalts und der mittlere pH-Wert in den Acker- und Grünlandböden des Burgenlands, Oberösterreichs, Salzburgs und der Steiermark. Daten aus BZI BORIS

			Bodenkohlenstoff %			Ton	Schluff	pH Wert
Region	Land-nutzung	Anzahl (n)	Mittelwert	Median	Maximum	Mittelwert		
	Acker	419	1.9	1.7	31.6	25.4	44.8	6.4
	Grünland	61	4.5	2.7	19.1	29.3	47.2	6.8
	Acker	769	1.2	1.2	7.0	17.6	52.4	6.1
	Grünland	879	3.3	2.8	33.9	14.4	52.2	6.6
	Acker	48	1.7	1.1	5.5	40.0	23.8	6.3
	Grünland	1157	2.4	1.6	45.4	31.2	23.9	5.5

	Acker	774	1.0	0.8	8.3	17.3	48.0	5.8
	Grünland	1582	2.4	1.9	8.6	15.0	47.2	5.6

Tabelle 7 Korrelation zwischen dem Gehalt an organischem Kohlenstoff im Boden und dem Ton-, Ton- und Schluffgehalt sowie dem pH-Wert für Acker- und Grünlandböden im Burgenland, Oberösterreich, Salzburg und der Steiermark. Daten aus BZI BORIS.

Region	Landnutzung	Anzahl (n)	Ton (%)	Ton+Schluff (%)	pH Wert
Burgenland	Acker	419	-0.06 n.s.	0.06 n.s.	0.29 ***
	Grassland	61	0.06 n.s.	0.26 *	0.05 n.s.
Oberösterreich	Acker	769	-0.29 ***	-0.11 **	0.03 n.s.
	Grassland	879	-0.09 *	0.25 ***	0.09 **
	Acker	48	0.04 n.s.	-0.05 n.s.	0.25 n.s.
Salzburg	Grassland	1157	0.18 ***	0.20 ***	0.15 ***
	Acker	774	-0.19 ***	0.00 n.s.	-0.6 n.s.
Steiermark	Grassland	1582	0.25 ***	0.21 ***	0.0 n.s.

Tabelle 8 Appendix 1 Overview of the assessed datasets from BORIS

	Burgenland	Salzburg	Upper Austria	Styria BORIS	Styria Extra
Number of sites	174	639	872	910	108
Number of samples	535	2174	1711	1994	300
Number of arable sites	142	14	378	265	53
Number of arable samples	420	51	767	773	158
Number of grassland sites	15	221	363	529	55
Number of grassland samples	60	1157	879	1582	142
Year(s) of soil survey	1998	2001	1990-1993	1986-2006	1986-2010

Method soil organic carbon	%TOC photometric and %TC coulometric	%TC micro-elementary analysis, similar to ÖN G1071 und ÖN G1072	%TOC photometric and titrimetric given as % C humus *	%TOC titrimetric given as humus *	%TOC titrimetric given as humus *
Correction factor	%TC - % inorganic C standard (ÖN L 1061), with and without H ₂ O ₂	%TC - % inorganic C with Sedigraph	humus * 0.58 standard (ÖN L 1061), with and without H ₂ O ₂	humus * 0.58 standard (ÖN L 1061), with and without H ₂ O ₂	humus * 0.58 standard (ÖN L 1061), with and without H ₂ O ₂
Method texture					

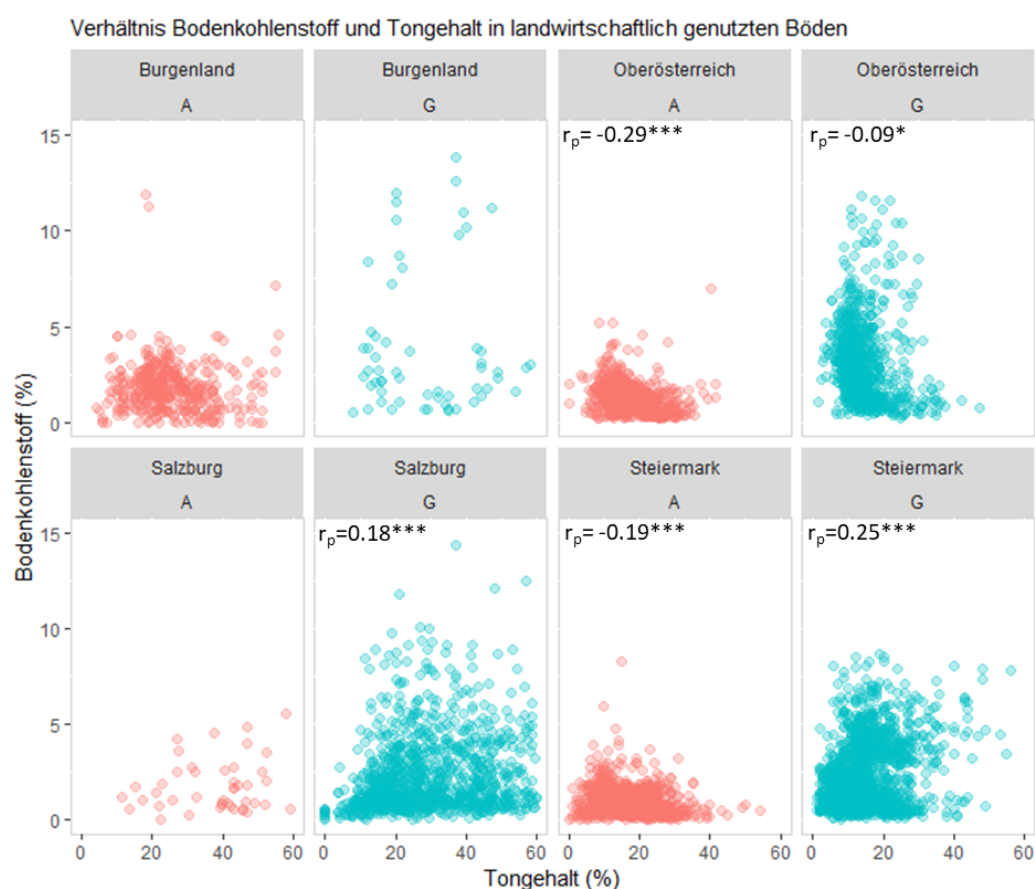


Abbildung 18/Appendix 2: Figure 1: Relationship between soil organic carbon and clay content in agricultural soils (blue = G = grassland, red = A = arable) from four Austrian federal states (Burgenland, Upper Austria, Salzburg and Styria). Data

from BZI BORIS. In case of significant correlation between the parameters correlation coefficient and degree of significance is given for the datasets (* = $p < 0.05$; ** = $p < 0.01$; *** $p < 0.001$).

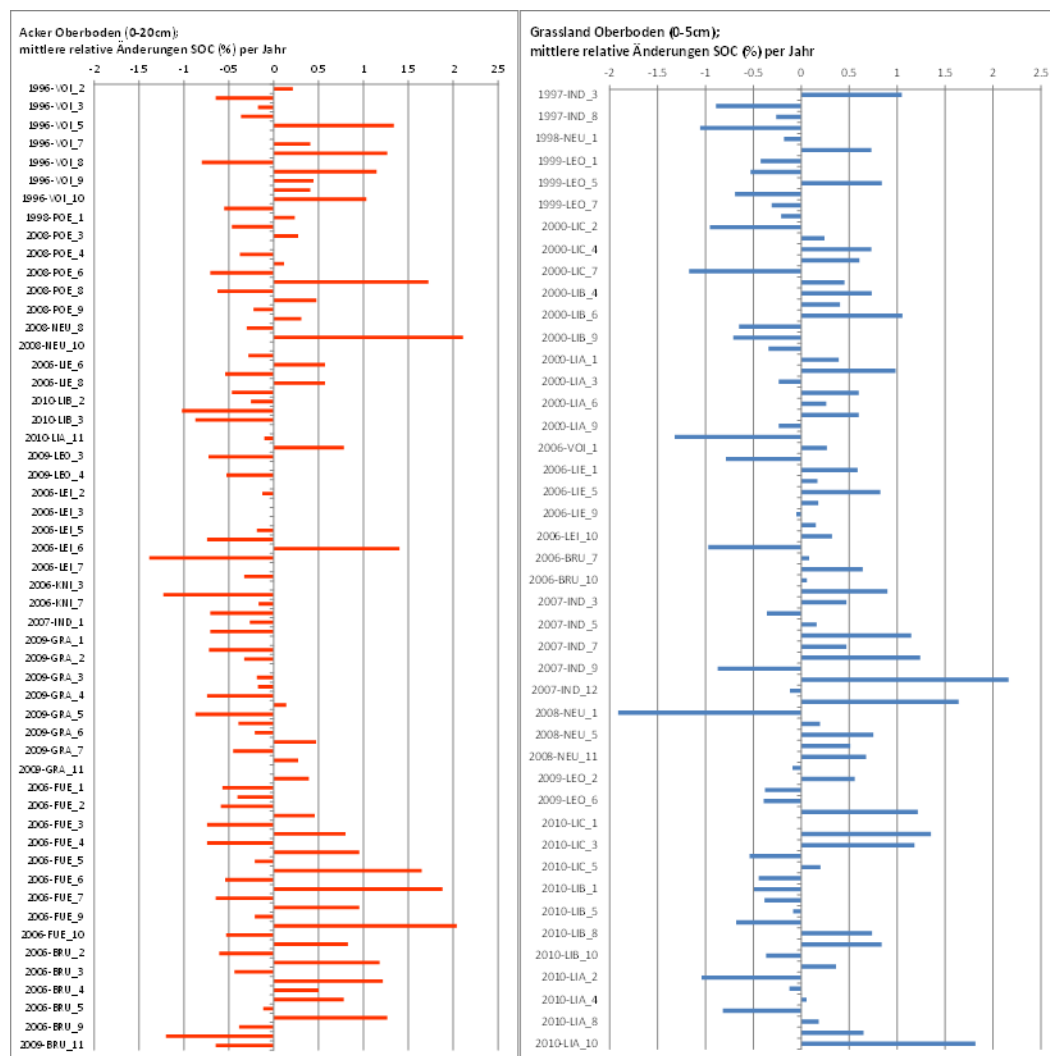


Abbildung 19/Figure 2 relative change in SOC content between repeated surveys at arable (red) and grasslands (blue) sites in Styria.

FAZIT

Aus BORIS konnten wir uns einen Überblick über den SOC-Gehalt auf regionaler Ebene verschaffen, allerdings enthält es bis heute nur Einzelergebnisse pro Standort, so dass diese Daten nicht aus BORIS abgeleitet werden können, auch wenn die Bundesländer die Bodenuntersuchungen wiederholt haben.

Es gab eine gewisse Korrelation zwischen dem SOC-Gehalt und dem Tongehalt in Grünlandböden, aber sowohl in Grünland als auch in Ackerböden ist ein Ensemble von Indikatoren für die Vorhersage des potenziellen SOC-Gehalts und der Veränderungen des SOC-Gehalts besser geeignet.

Die Quantifizierung der Veränderung des SOC-Gehalts im Laufe der Zeit zeigte, dass über einen Zeitraum von zwanzig bis dreißig Jahren ein mittlerer jährlicher Anstieg des SOC-Gehalts von 0,02 % in Ackerböden und 0,13 % in

Grünlandböden zu verzeichnen war, was weit vom 4-Per-mille-Ziel entfernt ist (Minasny et al., 2017). Die jährlichen Veränderungen waren nicht linear und reichten von -1,9 bis +2,2 % mit einem positiven Median in Grünland und einem negativen Median in Ackerböden.

Die Beziehung zwischen dem SOC-Gehalt und Ton oder Ton+Schluff in den Daten zeigt, dass die Bodentextur ein wichtiger Indikator sein kann. Allerdings ist die Korrelation in Ackerbaugebieten geringer, wo andere Faktoren wie die Landbewirtschaftung den SOC-Gehalt stärker beeinflussen (Bohner et al., 2016; Gerzabek et al., 2006; Leifeld et al., 2005; Spiegel, 2012; Vos et al., 2019). Mehrere Studien betonen die Bedeutung eines Ensembles von Indikatoren (EEA, 2021; Vos et al., 2019; Wiesmeier et al., 2019, 2014)

Referenzen

Bohner, A., Foldal, C.B., Jandl, R., 2016. Kohlenstoffspeicherung in Grünlandökosystemen - eine Fallstudie aus dem österreichischen Berggebiet / Carbon storage in grassland ecosystems – A case study from a mountainous region of Austria. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 67, 225–237. <https://doi.org/10.1515/boku-2016-0018>

EEA, 2021. Soil monitoring in Europe Indicators and thresholds for soil quality assessments, Version 24. September 2021 for REVIEW, EEA ETC/USL Report. European Environment Agency.

Gerzabek, M.H., Antil, R.S., Kögel-Knabner, I., Knicker, H., Kirchmann, H., Haberhauer, G., 2006. How are soil use and management reflected by soil organic matter characteristics: a spectroscopic approach. *European Journal of Soil Science* 57, 485–494. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00794.x>

Gerzabek, M.H., Strebl, F., Tulipan, M., Schwarz, S., 2005. Quantification of organic carbon pools for Austria's agricultural soils using a information system. *Canadian Journal of Soil Science* 491–498.

Hassink, J., 1997. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles. *Plant and Soil* 191, 77–87. <https://doi.org/10.1023/A:1004213929699>

Leifeld, J., Bassin, S., Fuhrer, J., 2005. Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 105, 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.03.006>

Minasny, B., Malone, B.P., McBratney, A.B., Angers, D.A., Arrouays, D., Chambers, A., Chaplot, V., Chen, Z.-S., Cheng, K., Das, B.S., Field, D.J., Gimona, A., Hedley, C.B., Hong, S.Y., Mandal, B., Marchant, B.P., Martin, M., McConkey, B.G., Mulder, V.L., O'Rourke, S., Richer-de-Forges, A.C., Odeh, I., Padarian, J., Paustian, K., Pan, G., Poggio, L., Savin, I., Stolbovoy, V., Stockmann, U., Sulaeman, Y., Tsui, C.-C., Vågen, T.-G., Wesemael, B. [van, Winowiecki, L., 2017. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>

Spiegel, H., 2012. Impacts of arable management on soil organic carbon and nutritionally relevant elements in the soil-plant system.

Vos, C., Don, A., Hobbey, E.U., Prietz, R., Heidkamp, A., Freibauer, A., 2019. Factors controlling the variation in organic carbon stocks in agricultural soils of Germany. *European Journal of Soil Science* 70, 550–564.
<https://doi.org/10.1111/ejss.12787>

Wenzel, W.W., Duboc, O., Golestanifard, A., Holzinger, C., Mayr, K., Reiter, J., Schiefer, A., 2022. Soil and land use factors control organic carbon status and accumulation in agricultural soils of Lower Austria. *Geoderma* 409, 115595.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115595>

Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., 2014. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. *Global Change Biology* 20, 653–665.
<https://doi.org/10.1111/gcb.12384>

Wiesmeier, M., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Haug, S., Reischl, A., Schilling, B., von Lützow, M., Kögel-Knabner, I., 2012. Soil organic carbon stocks in southeast Germany (Bavaria) as affected by land use, soil type and sampling depth. *Global Change Biology* 18, 2233–2245. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02699.x>

Wiesmeier, M., Urbanski, L., Hobbey, E., Lang, B., von Lützow, M., Marin-Spiotta, E., van Wesemael, B., Rabot, E., Ließ, M., Garcia-Franco, N., Wollschläger, U., Vogel, H.-J., Kögel-Knabner, I., 2019. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales. *Geoderma* 333, 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>

Weblinks:

<https://www.umweltbundesamt.at/umweltthemen/boden/boris/boris-datenzugang>

<https://wasser.umweltbundesamt.at/cadenza/pages/home/welcome.xhtml>

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechteinhaberschaft am

Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.