



BG/BRG  
GROSS  
ENZERSDORF

## VORWISSENSCHAFTLICHE ARBEIT

„Der Beitrag des Humusaufbaus zur Dekarbonisierung“

verfasst von

Lina Juszt

Klasse 8AR

betreut von

Susanne Urwaleck

BG/BRG Groß-Enzersdorf  
Freiherr-von-Smola-Straße 3  
2301 Groß-Enzersdorf

Groß-Enzersdorf, Februar 2023

## **Abstract**

Diese Vorwissenschaftliche Arbeit befasst sich mit dem Beitrag, den Humus durch die Speicherung von Kohlenstoff im Boden zur Dekarbonisierung der Atmosphäre leisten kann. Im Zuge dessen wird Humus durchleuchtet, welcher in seiner Funktion und in Hinblick auf die Biologie des Bodens einzigartig ist. Darüber hinaus ist die Klärung des Zusammenhangs zwischen Kohlenstoff, Kohlenstoffdioxid und Humus Teil dieser Arbeit. Der Humusgehalt des Bodens beeinflusst nicht nur den Ernteertrag, sondern wirkt auch durch resilientere Pflanzen, eine verbesserte Wasserspeicherkapazität und vor allem durch die Bindung von Kohlenstoff im Boden der Klimakrise entgegen. Die Art der landwirtschaftlichen Nutzung führt zu einer Veränderung des Humusanteils. Somit spielt die Landwirtschaft eine Schlüsselrolle bei der Bindung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und folglich bei der Bewältigung der Klimakrise. Des Weiteren wird die bisherige Humusentwicklung im Boden aufgegriffen. Humuszehrende Faktoren haben in der Vergangenheit zu einem erhöhten Ausstoß von Kohlenstoffdioxid geführt. Österreichische Humusbewegungen, welche sich der Umsetzung eines nachhaltigen Humusaufbaus verschrieben haben, werden überblicksmäßig angeführt.

Ziel dieser Arbeit ist eine Bewertung des Humusaufbaus als Lösungsansatz für die Klimakrise. Die Daten von „Humus+“ dienen dabei als wichtigste Basis für die Berechnung des Humuspotenzials auf österreichischen Ackerflächen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass durch Humusaufbau ein wesentlicher Beitrag zur Kompensation von Kohlenstoffdioxidemissionen geleistet werden kann.

# Inhaltsverzeichnis

Abstract .....	ii
1. Einleitung .....	1
2. Humus .....	3
2.1. Abgrenzung Humus, Kompost, Pflanzenkohle.....	3
2.1.1. Begriffsdefinition Humus.....	3
2.1.2. Begriffsdefinition Kompost .....	3
2.1.3. Begriffsdefinition Pflanzenkohle.....	3
2.1.4. Entstehung des Humus .....	4
2.1.5. Kleinstlebewesen im Humus .....	4
2.1.6. Bedeutung von Humus.....	5
2.2. Humus und Kohlenstoff .....	5
2.2.1. Kohlenstoffanteil im Humus .....	5
2.2.2. Zusammenhang zwischen Kohlenstoff und Kohlenstoffdioxid .....	5
2.2.3. Kohlenstoffbindungspotenzial im Humus.....	6
2.3. Anthropogen gebundener Kohlenstoff – Terra Preta .....	6
3. Humus in der Landwirtschaft.....	7
3.1. Steigende Bedeutung österreichischer Humus-Initiativen .....	8
3.2. Einfluss von Humus auf den landwirtschaftlichen Ertrag .....	9
3.3. Humusgehalte in österreichischen Böden.....	11
3.3.1. Aktueller Humusgehalt in österreichischen Ackerflächen.....	11
3.3.2. Langfristige Veränderung des Humusgehalts.....	13
3.3.3. Veränderung des Humusgehalts in den letzten Jahrzehnten.....	16
3.4. Humuszehrende Faktoren.....	17
3.4.1. Kunstdünger.....	17
3.4.2. Intensive Bodenbearbeitung.....	19
3.4.3. Gülleausbringung.....	20
3.4.4. Monokulturen .....	20
3.4.5. Pestizide.....	21
3.5. Humusaufbauende Faktoren .....	21
3.5.1. Fruchtfolge .....	21
3.5.2. Mischkulturen .....	21
3.5.3. Untersaaten.....	22
3.5.4. Gründüngung .....	22
3.5.5. Winterbegrünung .....	22
3.5.6. Agroforstsysteme.....	23

3.5.7.	Minimalbodenbearbeitung .....	24
3.5.8.	Kompost als Düngemittel.....	24
3.5.9.	Optimales Vorgehen.....	25
4.	Möglicher Beitrag des Humus als Kohlenstoffsенke .....	25
4.1.	Dekarbonisierung oder Rekarbonisierung?.....	26
4.2.	Relevanter österreichischer Ackerboden .....	27
4.3.	Aktuell genutzte Ansätze zur Kohlenstoffberechnung in Österreichs Böden .....	27
4.3.1.	Austrian Carbon Calculator.....	27
4.3.2.	Austrian Soil Carbon Sequestration Map: Kohlenstoff in Österreichs Böden....	28
4.4.	Wieviel C-Sequestrierung ist möglich? Modell „Humus+“ .....	31
5.	Potenzialanalyse: Wie viel Rekarbonisierung ist möglich? .....	33
5.1.	Klimaschutzzielpfad für Österreich.....	33
5.2.	Berechnungsbasis für Rekarbonisierungspotenzial .....	34
5.3.	Humusaufbaupotenzial als Kohlenstoffsенke .....	35
5.4.	Potenzial im Verhältnis zum maximalen CO <sub>2</sub> -Ausstoß laut Klimaschutzzielpfad.....	36
5.5.	Versuch einer Einordnung als Lösungsansatz für die Klimakrise.....	38
6.	Fazit.....	40
7.	Literaturverzeichnis.....	42
8.	Abbildungsverzeichnis .....	44
9.	Tabellenverzeichnis.....	44

## 1. Einleitung

Diese Arbeit widmet sich dem potenziellen Beitrag, welchen die Erhöhung des Humusgehalts in heimischen Böden zur Dekarbonisierung bewirken kann. Dabei beschränkt sich diese Arbeit hauptsächlich auf österreichisches Ackerland. Die Verknüpfung von Landwirtschaft und Humus ist essentiell. Einerseits hat der Humusanteil im Boden durch die gebundenen Nähr- und Mineralstoffe und die Wechselwirkung der Mikroorganismen mit den Pflanzen Einfluss auf den Ernteertrag, andererseits wirkt der Aufbau von Humus der Klimakrise entgegen, etwa durch widerstandsfähigere Pflanzen, den Schutz vor Erosion, durch die Verbesserung der Wasserspeicherkapazität und vor allem durch die Bindung von Kohlenstoff im Boden.

Das Ergebnis dieser Arbeit, welche auf der Methodik der hermeneutischen Vorgehensweise beruht, soll eine Darstellung und Zusammenführung vorhandener Informationen betreffend Humus als Kohlenstoffsенke auf österreichischen Böden sein. Darauf aufbauend soll mittels einer einfachen Potenzialanalyse ermittelt werden, wie viel CO<sub>2</sub> in den nächsten zwei Jahrzehnten auf heimischen Ackerböden gebunden werden könnte.

Im zweiten Kapitel steht die Klärung des Begriffs Humus sowie die Verbindung von Kohlenstoff und Kohlenstoffdioxid zu Humus im Vordergrund. Ein Hauptaspekt des dritten Kapitels ist das Anführen landwirtschaftlicher Einflussfaktoren, welche entweder Humusaufbau oder Humusabbau bedingen. Zudem dient dieses Kapitel der Auflistung österreichischer Humusinitiativen und zeigt die Veränderung der Humusgehalte in Österreichs Böden auf. Die Darstellung von Analysen und Studien zum Thema Humus- und Kohlenstoffgehalt in österreichischen Böden sowie deren Entwicklung steht im vierten Kapitel im Fokus. Des Weiteren werden bestehende Modelle und empirische Ergebnisse zu erreichten Humusanreicherungen bei monetären Anreizen, wie dies bei Humus+ der Fall ist, dargelegt. Im letzten Kapitel soll ermittelt werden, wie viel des anthropogen ausgestoßenen Kohlenstoffdioxids durch Humusaufbau in Österreich, hier auf Ackerböden beschränkt, kompensiert werden kann. Damit verbunden wird die Relevanz für das Entgegenwirken der Klimakrise aufgezeigt.

Unter Klimakrise wird hier die anthropogen verursachte negative Beeinflussung des Klimas, vor allem durch CO<sub>2</sub>-äquivalente Emissionen, verstanden. Die Aktualität zeigt sich in der Häufung von Wetterextremen, beispielsweise Unwettern und Dürren. Demnach ist es an der

Zeit, Lösungsansätze zu identifizieren und ihre Wirksamkeit zu prüfen. Der Humusaufbau stellt ein zu berücksichtigendes Konzept dar.

## **2. Humus**

### **2.1. Abgrenzung Humus, Kompost, Pflanzenkohle**

In diesem Kapitel werden die Begriffe Humus, Kompost und Pflanzenkohle definiert, genauer betrachtet und differenziert. Weiters wird die Bildung von Humus, dessen Bewohner und die Bedeutung von Humus aufgezeigt.

#### **2.1.1. Begriffsdefinition Humus**

Humus gilt als Überbegriff für Boden, welcher einen großen Anteil organischen Ursprungs aufweist (Dunst, 2011, S. 32). Dieser wird mithilfe diverser Ab- und Umbauprozesse von Seiten der Mikroorganismen gebildet. Die Humusschicht der Erde weist zumeist eine maximale Tiefe von dreißig Zentimeter auf. Diese „Haut“ ermöglicht das irdische Leben. (Hennig, 2011, S. 15)

Essenziell für das Verständnis des Humusbegriffs ist das Zusammenspiel von Boden und dessen Organismen, nämlich ist Humus der

„Ausdruck der biologisch-funktionellen Leistung, der produktiven Tätigkeit, des Verhaltens einer fruchtbaren Erde, das heißt also Ausdruck der tätigen Beziehung zwischen dem Mutterboden und allen anderen Organismen.“ (Rusch, 2014, S. 93)

#### **2.1.2. Begriffsdefinition Kompost**

Bei der Kompostierung wird aus organischer Masse eine wertvolle Basis für den Humusaufbau geleistet. Im Prozess der Rotte sind unter anderem aerobe Mikroorganismen, die Sauerstoff zum Überleben benötigen, beteiligt. Die Temperatur steigt im Verlauf der Kompostierung auf über 60°C. Dies trägt dazu bei, alle Krankheitserreger und jegliche Unkrautsamen abzutöten. Guter Kompost, welcher zum Humusaufbau geeignet ist, riecht intensiv nach Walderde oder feuchten Pilzen. Aufgebrachter Kompost aktiviert die Bodenmikrobiologie und fördert die Humusbildung. (Dunst, 2015, S. 12-14)

#### **2.1.3. Begriffsdefinition Pflanzenkohle**

Pflanzenkohle bezeichnet das Endprodukt anaerober Verkohlung von rein pflanzlichen Ausgangsstoffen wie etwa Holz und Ernterückständen. Sie ist Bestandteil und Grundlage der Terra Preta, einer fruchtbaren Schwarzerde im Amazonasbecken, die in Kapitel 2.3 näher

erläutert wird. Obwohl sie einer anthropogenen Herstellung unterliegt, zeichnet sich die Pflanzenkohleproduktion aufgrund ihrer Nachhaltigkeit aus. Die gewonnene Kohle wird zerkleinert, damit anschließend das Verteilen in der Erdschicht oder das Hinzufügen im Kompost ermöglicht wird. (Dunst, 2015, S. 196)

#### **2.1.4. Entstehung des Humus**

Die Humusbildung erfordert ausreichend organisches Ausgangsmaterial. Dazu gehören insbesondere pflanzliche Reste wie Wurzeln, Blätter und Stroh. Die sogenannte „erste Gruppe“, bestehend aus widerstandsfähigen Mikroorganismen und Tieren, etwa Käfern oder Regenwürmern, zersetzt das organische Material. Zusätzlich findet ein Abbau durch Prokaryoten und Eukaryoten in die grundlegenden Bestandteile wie Aminosäuren und Nährstoffionen, etwa Magnesium oder Kalzium, statt. Anschließend werden diese abermals mithilfe von weiteren Mikroben zu Nährhumus umgewandelt. Dieser Vorgang erfordert spezielle Bedingungen, etwa einen beständigen Nässegrad, ein aerobes Klima und eine ausreichende Diversität an Bestandteilen. Die in der pflanzlichen Wurzelhaarzone beheimateten Mikroorganismen bilden mit dem Gewächs eine Symbiose. Die Pflanze verschafft den Mikroben Energie, während sie von den Nährstoffen des Nährhumus profitiert. (Dunst, 2011, S. 33-37)

#### **2.1.5. Kleinstlebewesen im Humus**

An erster Stelle ist zu sagen, dass der Diversität der mikrobiellen Spezies eine größere Bedeutung zugeschrieben wird als der Quantität (Dunst, 2011, S. 60). Die Gesamtheit aller im Boden beheimateten Organismen tragen den Namen Edaphon. In jedem Gramm Humus finden sich über eine Billion Kleinstlebewesen. (Hennig, 2011, S. 12)

Die Bodenbewohner können in zwei Gruppen, nämlich die Mikrofauna und die Mesofauna, unterteilt werden. Zu ersterer zählen pflanzliche Mikroorganismen, wie Pilze, Algen und Aktinomyzeten, gleichbedeutend mit Strahlenpilzen, sowie tierische Mikroorganismen, etwa Geißeltierchen, Wurzelfüßer und Wimperntierchen. Die Mesofauna beinhaltet Kleintiere, beispielsweise Rädertierchen, Fadenwürmer, Milben und Springschwänze, und größere



Kleintiere, zu denen Borstenwürmer, Schnecken, Spinnen, Asseln, Vielfüßler, Käfer, Larven, Kerbtiere und Regenwürmer gehören. (Scheub & Schwarzer, 2017, S. 126-130)

### **2.1.6. Bedeutung von Humus**

Ein erhöhter Humusgehalt hat positive Auswirkungen auf den Boden. Er führt zu verbesserter Aufnahme- und Speicherfähigkeit von Wasser. Das wird aufgrund der klimatischen Veränderungen, insbesondere Hitzeperioden und Trockenheit, immer wichtiger für eine erfolgreiche Landwirtschaft. Jedes zusätzliche Prozent Humus kann bis zu 400 m<sup>3</sup> Wasser pro Hektar aufnehmen. Im Humus sind für Pflanzen überlebensnotwendige Nährstoffe und Spurenelemente enthalten. Die sehr hohe Kationenaustauschkapazität (KAK) bindet Nährstoffe an der Oberfläche der Humusstruktur, die in Mangelsituationen an Pflanzen abgegeben werden. Bodenbearbeitung und Pflanzenschutz Aufwand können minimiert werden und die Pflanzengesundheit steigt, was Auswirkungen auf die Lebensmittelqualität mit sich bringt. (Dunst, 2011, S. 20-23)

## **2.2. Humus und Kohlenstoff**

### **2.2.1. Kohlenstoffanteil im Humus**

Einer der wichtigsten Komponenten des Humus ist Kohlenstoff, welcher 58 % dieser Erdschicht darstellt. Demnach übernimmt Humus die Aufgabe der Kohlenstoffbindung. (Dunst, 2011, S. 38) Zumeist liegt Kohlenstoff in Verbindung mit Sauerstoff als Kohlenstoffdioxid in der Atmosphäre vor. Hennig verweist auf die Wichtigkeit des Kohlenstoffs sowie des Sauerstoffs als Grundstoffe für die Pflanzenwelt. Kohlenstoff ist somit elementar für die Existenz der Pflanze. (Hennig, 2011, S. 122-124)

### **2.2.2. Zusammenhang zwischen Kohlenstoff und Kohlenstoffdioxid**

Eine Kohlenstoffdioxidverbindung, bestehend aus zwei Sauerstoffatomen, gebunden an ein Kohlenstoffatom, hat eine molare Masse von 44 g/mol. Diese ergibt sich aus der molaren Masse 12 g/mol des Kohlenstoffatoms und zwei Atomen Sauerstoff mit je molarer Masse 16 g/mol. Um den Umrechnungsfaktor zwischen Kohlenstoff und Kohlenstoffdioxid zu berechnen, muss anschließend eine Division von 44 geteilt durch 12 durchgeführt werden.

Das gerundete Ergebnis 3,67 beschreibt daher deren Verhältnis zueinander. Somit werden in einer Tonne Kohlenstoff 3,67 Tonnen des Treibhausgases Kohlenstoffdioxid gebunden. (Dunst, 2011, S. 38)

Die Frage nach der Beziehung zwischen diesem Faktor und den vom Menschen verursachten Kohlenstoffdioxidemissionen wird das nächste Unterkapitel durchleuchten.

### **2.2.3. Kohlenstoffbindungspotenzial im Humus**

Im Zusammenhang mit den zuvor erwähnten Angaben lässt sich ableiten, dass eine Tonne Humus rund 580 Kilogramm Kohlenstoff enthält. Wird dieser Betrag mit dem Faktor 3,67 multipliziert, errechnet sich, dass beim Abbau von einer Tonne Humus 2,13 Tonnen Kohlenstoffdioxid freigesetzt werden. Diese Erkenntnis gibt sowohl Aufschluss über die Kohlenstoffbindung, die durch den Humusaufbau erreicht werden könnte, als auch über die Auswirkungen des viel stärker vorzufindenden Abbaus aus dem Boden in die Atmosphäre.

### **2.3. Anthropogen gebundener Kohlenstoff – Terra Preta**

Exemplarisch soll hier beschrieben werden, dass das Konzept der Kohlenstoffbindung, auch Kohlenstoffsequestrierung genannt, im Boden bereits bei indigenen Hochkulturen umgesetzt worden ist.

Die Schwarzerde Terra Preta ist laut Dunst die fruchtbarste Erde weltweit. Essenziell in der Zusammensetzung der Terra Preta ist das Vorhandensein von Pflanzenkohle. (Dunst, 2015, S. 196) Aufgrund der Tatsache, dass sie ihren Ursprung im Amazonasgebiet findet und bereits zu Zeiten der indigenen Stämme existiert hat, wird sie auch als Terra Preta do Indio bezeichnet. Die Terra Preta ist ein Produkt anthropogener Erzeugung. Diese Humusschicht ist teilweise über 2.000 Jahre alt. Einst sind die tropischen Böden humusarm und dessen Fruchtbarkeit sehr gering gewesen. Durch Rücksichtnahme auf die Natur und Verwendung von pflanzlichen, tierischen und menschlichen Abfallstoffen sowie Tonscherben ist den Ureinwohnern Amazoniens der Aufbau einer großflächigen und bis zu zwei Meter tiefen Humusschicht gelungen. Aus diesem Grund konnten die Indigenen hohe Erträge erzielen und sich wegen ausreichend vorhandener Nahrung zu Hochkulturen entwickeln. (Scheub, Pieplow, & Schmidt,

2015, S. 42-46) Daraus kann abgeleitet werden, dass Humus dauerhaft, über tausende Jahre, Kohlenstoffdioxid als Kohlenstoff binden kann (Dunst, 2011, S. 178).

Der Humusabbau, beziehungsweise das Potenzial dieser Kohlenstoffbindung in der Landwirtschaft, wird im nächsten Kapitel erörtert.

### 3. Humus in der Landwirtschaft

„Humus entsteht durch das Zusammenspiel von Pflanzen mit den Bodenlebewesen (Mikroorganismen, Pilze, Insekten, etc.). Wurzelausscheidungen, Pflanzenreste und auch abgestorbene Bodenlebewesen werden kontinuierlich verstoffwechselt und lebend im Boden verbaut. Der Humusgehalt des Ackerbodens wird daher maßgeblich von der Art der Bewirtschaftung beeinflusst. Durch eine Änderung der Bewirtschaftung ändert sich auch der Humusgehalt.“ (Verein Humus+, kein Datum)

Humusaufbau bezeichnet den Prozess der partiellen Umwandlung des Kohlenstoffs, welchen die Pflanze sequestriert hat, dauerhaft in Humusstoffe, sogenannte Huminsäuren (Verein Humus+, kein Datum). Mikroorganismen bewirken ein Zusammenkleben der organischen und mineralischen Masse im Boden. Dabei entstehen rund geformte Krümel mit einer maximalen Größe von fünf Millimeter. Diese Krümel haben eine dunkelbraune Färbung und sind normalerweise nicht wasserlöslich. Dadurch entsteht die lockere Bodenstruktur, die jedoch durch die Humusstoffe, welche eine klebende Wirkung haben, eine zureichend stabile Konsistenz erhält. Die Humusstoffe unterliegen der permanenten Neuerstellung durch diverse Bakterien. Ein weiterer Kitt besteht aus einem starken Geflecht aus Pilzfäden, sogenannten Pilzhyphen. *„Wenn die Biologie im Boden stirbt, zerfällt auch der Krümel und der Boden verdichtet.“* (Dunst, 2011, S. 72)

In dieser Arbeit werden CO<sub>2</sub>-Emissionen gleichgesetzt mit CO<sub>2</sub>-Äquivalentemissionen, also die Einbeziehung und Umrechnung von anderen Treibhausgasen auf Kohlenstoffdioxid.

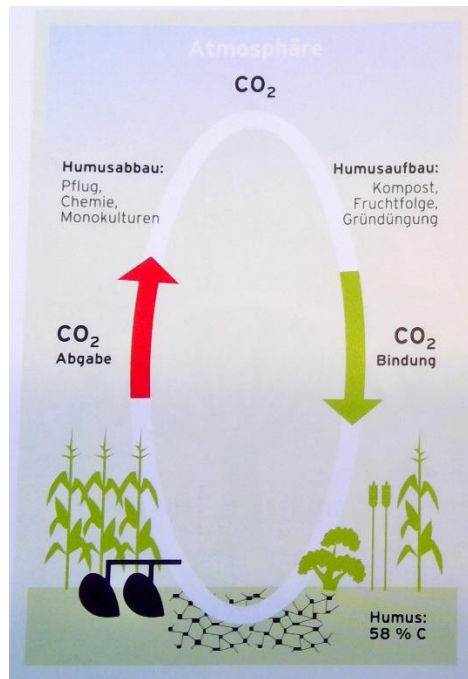


Abbildung 1: Landwirtschaftliche Bewirtschaftung kann zu Humusauf- oder -abbau führen (Dunst, 2011, S. 14)

„Humusabbau bedeutet, dass nicht nur die gesamte organische Masse, die auf dem Boden gewachsen ist, wieder zerlegt wird, sondern dass zusätzlich auch die Humusvorräte im Boden angegriffen werden und der darin gespeicherte Kohlenstoff in Form von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre entweicht. In den letzten Jahrzehnten wurde weltweit ‚humuszehrend‘ gewirtschaftet – das heißt, dass die Humusreserven der Ackerböden durch die Bewirtschaftung (Bodenlockerung, Handelsdünger, Spritzmittel, Monokulturen etc.) reduziert wurden. Im Vergleich zu den 1930er-Jahren haben wir nur mehr ein Drittel bis maximal die Hälfte des ursprünglichen Humusvorrates im Boden. Durch eine Änderung der Bewirtschaftungsweise von Ackerflächen kann im Boden Humus aufgebaut, sowie langfristig stabilisiert werden und nicht als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre entweichen.“ (Verein Humus+, kein Datum)

### 3.1. Steigende Bedeutung österreichischer Humus-Initiativen

Im Zuge des immer wichtiger werdenden Bereichs Humus entstehen immer mehr Humus-Initiativen zur Förderung des Humusaufbaus in Österreich. Vorreiter sind die Humus+Tage der Ökoregion Kaindorf, die 2022 bereits zum 16. Mal veranstaltet worden sind. Die Initiative Humus+ Modell Ökoregion Kaindorf ist abgesehen von den Humus+Tagen durch Veranstaltungsreihen und Fachinformationen rund um das Thema Humus aktiv. (Verein Humus+, kein Datum)

Eine weitere Initiative ist die Humus-Bewegung. Ziel ist der Wissenstransfer zu den „*Prinzipien der Regenerativen Landwirtschaft*“ und die Unterstützung bei der Bodenbelebung und des Humusaufbaus (HUMUS Bewegung, kein Datum).

Boden.Leben, Verein für klimaangepasste und aufbauende Landwirtschaft, sieht Schwerpunkte in der Bedeckung und Durchwurzelung der Böden und bietet praxisbezogene Forschung, Veranstaltungen und gibt Auskunft rund um das Thema Bodenfruchtbarkeit (Boden.Leben, kein Datum).

Auch der generelle Trend zum biologischen Landbau unterstützt den Anstieg des Humusgehalts, welcher den Boden in all seinen Funktionen fördert. „*Ein Prinzip des biologischen Landbaus ist: ‚Ernähre den Boden und nicht die Pflanze‘. Der Boden gibt dann der Pflanze alles was sie braucht.*“ (BML, kein Datum)

### **3.2. Einfluss von Humus auf den landwirtschaftlichen Ertrag**

Laut dem Verein Humus+ beeinflusst Humus den landwirtschaftlichen Erfolg über mehrere Ebenen:

Fruchtbarer, humoser Boden verfügt über alle Nähr- und Mineralstoffe, die notwendig für das Bestehen der Pflanze sind. Die Bereitstellung dieser Stoffe für die Pflanze wird durch die Mikroben bei Bedarf sichergestellt. Das Vorhandensein der gegenwärtig erforderlichen Nähr- und Mineralstoffe geht mit einem optimierten Pflanzenwachstum einher, welches direkt den Ertrag steigert.

Humus ermöglicht eine höhere Kapazität an speicherbarem Wasser. In Phasen mit unzureichend oder übermäßigem Niederschlag können so Ernterückgänge minimiert und ausgeglichen werden.

Humose Böden besitzen eine standhafte oberste Schicht, die das Abtragen von Boden verhindert, indem sie große Wassermengen speichert, anstatt Hochwasser und Überflutungen zu verursachen. Der Boden ist so vor starken Witterungseinflüssen geschützt und bleibt auf diese Weise fruchtbarer.

Die krümelige, lose Bodenstruktur von humushaltiger Erde ermöglicht eine gewisse Luftzirkulation und Belüftung, welche das Wachstum von tiefen, verflochtenen Wurzeln

zulässt. Über das optimierte Wurzelwerk kann die Pflanze insbesondere Nährstoffe besser nutzen und demnach mehr Ertrag generieren.

Durch den besseren Gesundheitsstatus der Pflanzen werden weniger bis keine Spritzmittel benötigt. Durch die verminderten Ausgaben und den eingesparten Arbeitsaufwand wird die Rentabilität erhöht und die Umwelt geschont. Die erzeugten Nahrungsmittel enthalten mehr Nährstoffe und sind qualitativ hochwertiger, was einen möglichen Preisaufschlag rechtfertigt. Die reduzierte Bodenbearbeitung durch die Krümelbeschaffenheit des humosen Bodens senkt den Maschinen- beziehungsweise Personeneinsatz, was ein erhebliches Einsparungspotenzial darstellt. Weiters entstehen durch den verringerten Einsatz von landwirtschaftlichen Maschinen weniger Kohlenstoffdioxidemissionen und die Verdichtung des Bodens, die die Folge der mechanischen Bodenlockerung ist, wird verhindert.

Humus bildet mit den vorhandenen Bodenorganismen eine Symbiose. *„Durch biologische Aktivität wird der Bodenkörper gelockert und mineralischer Boden mit Humus vermischt.“* (Verein Humus+, kein Datum) Die lose Bodenbeschaffenheit und Krümelbildung bewirkt wiederum eine verbesserte Tätigkeit der Bodenorganismen und die Vielfalt an Bodenbewohnern vergrößert sich, was zu einer gesteigerten Pflanzenqualität und Ertragsteigerung führt. Der Kreislauf schließt sich.

Humoser Boden besitzt eine überdurchschnittlich gute Bodenqualität und die Fähigkeit, giftige und schädliche Substanzen aus der Luft und dem Wasser zu filtern. Demnach besitzt Humus eine reinigende Wirkung, die auch in Bezug auf die Grundwasserqualität zum Tragen kommt. Landwirtschaft, welche sich die Qualität des Bodens, das Wohlergehen der Bodenorganismen und den Umweltschutz zum Ziel setzt, kann mit einem nachhaltigen Fortbestand auch in Zukunft rechnen. Dieses Konzept verleiht solchen Landwirtschaften ein positives Image und sie übernehmen eine Vorbildfunktion. So gewinnt die ressourcenschonende Landwirtschaft als Mittel der Verlangsamung der Klimakrise an Stellenwert und ist für die gesamte Volkswirtschaft sinnvoll.

Gleichzeitig stellen Böden eine Hauptrolle bei der Kohlenstoffdioxidbindung dar. Eine Steigerung des Humusgehalts erhöht die Bindungskapazität von Kohlenstoffdioxid. Es existieren Projekte, wie das Humus+ Konzept, welches im Kapitel 4.4 näher erläutert wird. Durch dieses profitieren Landwirtinnen und Landwirte an der humusfördernden

Umgestaltung ihrer Landwirtschaft. Pro sequestrierte Tonne Kohlenstoffdioxid erhalten Landwirtinnen und Landwirte Prämien. (Verein Humus+, kein Datum)

### 3.3. Humusgehalte in österreichischen Böden

#### 3.3.1. Aktueller Humusgehalt in österreichischen Ackerflächen

Unterschiedliche Regionen Österreichs weisen verschieden große Anteile an Humus auf. Es liegen dazu verschiedene Studien vor. Diese werden in der folgenden Tabelle gegenübergestellt. Als Überblick werden die Kohlenstoffgehalte in allen österreichischen Böden angeführt, jedoch fokussiert sich die Arbeit lediglich auf die Ackerflächen. Die Tabelle zeigt, dass es auch bei anderen Nutzungsarten des Bodens wie Grünland etc. grundsätzlich Potenzial gäbe, mehr Kohlenstoff im Boden zu speichern. Das übersteigt allerdings das Thema dieser Arbeit.

C-Vorräte in österr. Böden [tC/ha]	Studie (Maßzahl, original Tabelle) Bodenschicht		
<b>Landnutzung</b>	Baumgarten et al. 2021 (arithm. Mittel, Tab. 1) 0-30cm	Haslmayr et al. 2018 (Median, Tab. 13) 0-30cm	Gerzabek et al. 2005 (Median, Tab. 2) 0-20cm
<b>Acker</b>	62,4	69,7	41,3
<b>Almen</b>	113,0	91,3	91,8
<b>Grünland</b>	-	-	60,5
<b>Extensives Grünland</b>	94,7	72,0	
<b>Intensives Grünland</b>	91,5	73,1	
<b>Weingärten</b>	49,1	51,5	39,3
<b>Spezialkulturen (Obst...)</b>	-	63,2	57,0
<b>Wald - gesamt</b>	128,2	106 (Mittelwert)	-
<b>Wald – Auflagehumus</b>	22,2	17 (Mittelwert)	-
<b>Wald – Mineralboden 0-30cm</b>	106,0	93 (Mittelwert)	-
<b>Moore</b>	220 (aus Literatur)	220 (aus Literatur)	-
<b>Siedlungen</b>	39,6 (angenommen)	39,6 (angenommen)	-
<b>Gesamt</b>	99,8 (Mittelwert - eig. Berechnung) 93,1 (Median - eig. Berechnung)	75 (Mittelwert!)	57 (Median - eig. Berechnung)

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Kohlenstoffgehalte in Österreichs Böden in tC/ha (vgl. Forstner, 2022)

Der Wert von 62,4 t C/ha auf Ackerflächen in der ersten Spalte der oben zitierten Studie entspricht somit rund 108 t Humus/ha (62,4 t C/ha dividiert durch 0,58 Kohlenstoffanteil im Humus).

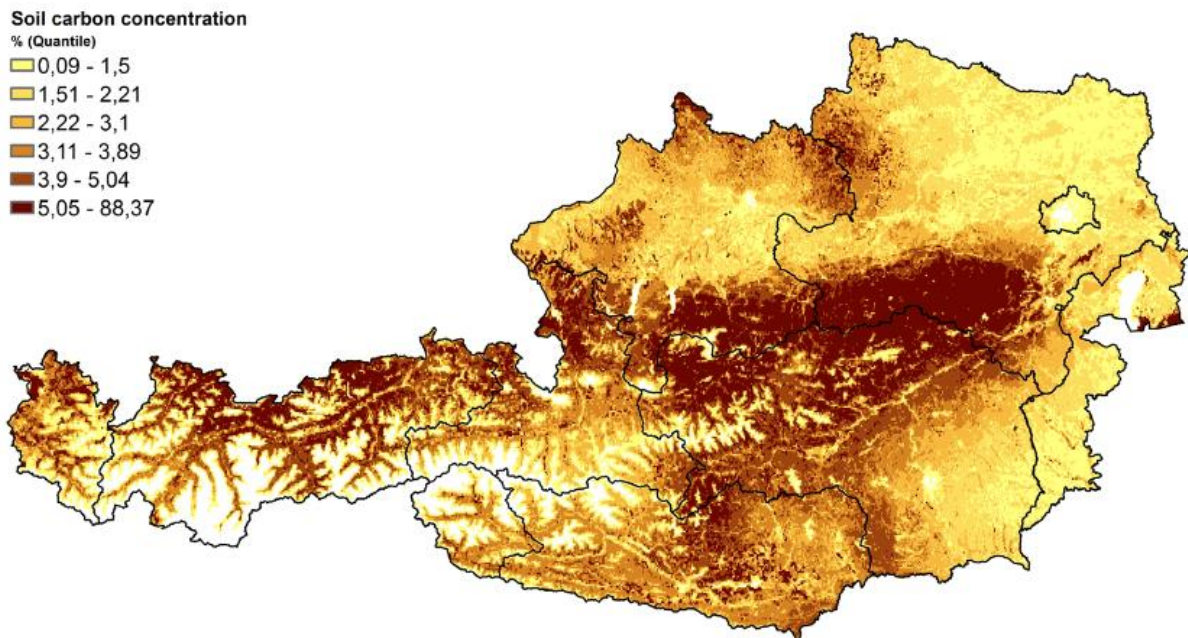


Abbildung 2: Kohlenstoffanteil in Österreichs Böden, 0 bis 30 cm Tiefe (Baumgarten, et al., 2021, S. 4)

Die niedrigsten Kohlenstoffkonzentrationen finden sich in Ostösterreich und im oberösterreichischen Zentralraum. Dies sind jene Böden, die vor allem landwirtschaftlicher Nutzung unterliegen. (Baumgarten, et al., 2021, S. 3)

Das Projekt ASOCseq, welches unter Kapitel 4.3.2 näher erläutert wird, zeigt einen Überblick über den unterschiedlichen Kohlenstoffanteil des Bodens auf der Landkarte und damit umgerechnet auch den Humusanteil. Die folgende Grafik stellt den Kohlenstoffanteil des Bodens in Tonnen Kohlenstoff pro Hektar in Österreich für das Jahr 2020 dar.



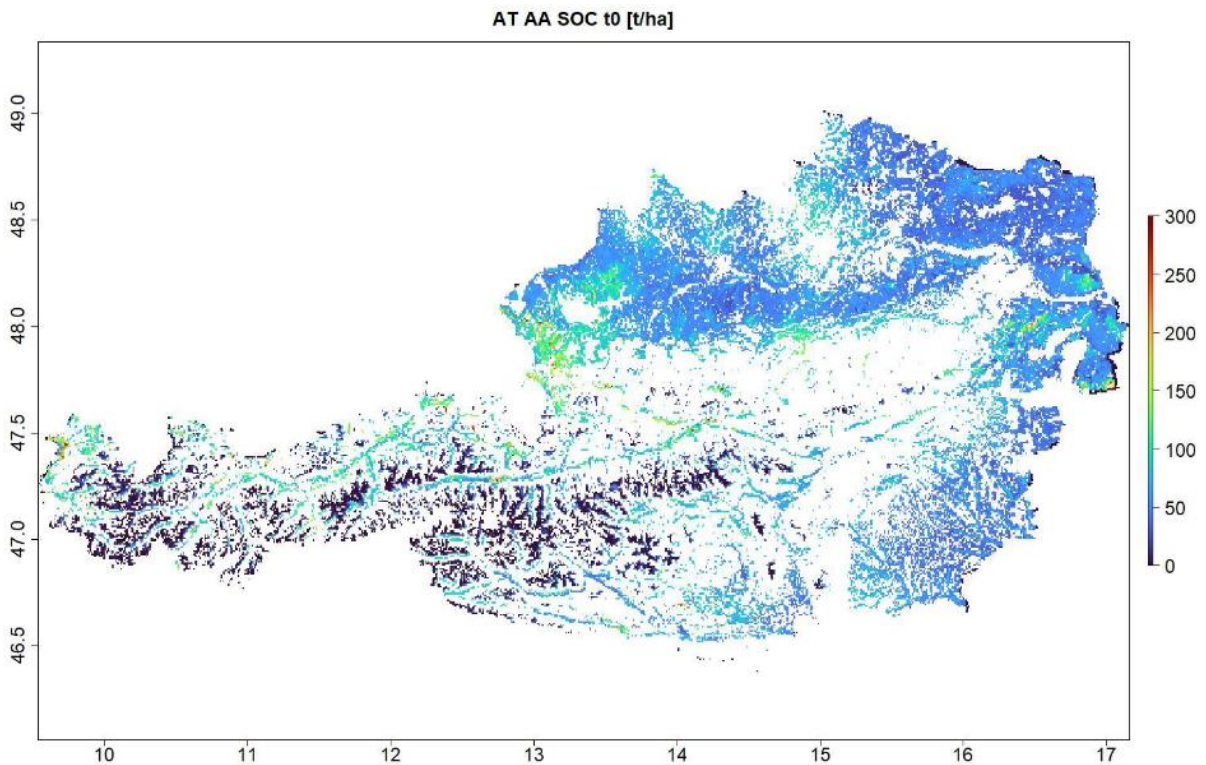


Abbildung 3: Kohlenstoffvorräte in Österreichs Böden im Jahr 2020 (Haslmayr, et al., 2022, S. 36)

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass mittlerweile rund 90 % aller österreichischen Ackerflächen einen Mindesthumusgehalt von 2 % aufweisen. Zudem erzielen Ackerflächen, die nach biologischem Konzept bearbeitet werden, eine wesentliche Humuszunahme. (AGES, kein Datum)

### 3.3.2. Langfristige Veränderung des Humusgehalts

Speziell in den letzten 200 Jahren ist der Kohlenstoff-Gehalt in den Böden gesunken. Dies geht vor allem mit der Intensivierung der Ackerwirtschaft und der Weidehaltung einher. Bei der Studie von Sanderman, Hengl und Fiske wird in der Simulation von 116 Mrd. t C Verlust in den obersten 2 m des Bodens ausgegangen. Es besteht ein Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoff-Verlust des Bodens und dem exponentiellen Anstieg der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Global hat es bis ins Jahr 1800 einen niedrigen jährlichen Kohlenstoff-Verlust von geringer als 0,05 Mrd. Tonnen Kohlenstoff pro Jahr gegeben. Im darauffolgenden Jahrhundert sind Kohlenstoff-Verluste von bis zu 0,3 Mrd. Tonnen Kohlenstoff pro Jahr berechnet worden. Auch im vergangenen Jahrhundert ist der Kohlenstoff-Verlust anhaltend, jedoch geringer. Er beträgt 0,13 Mrd. Tonnen Kohlenstoff pro Jahr. Das bedeutet, dass seit

Beginn der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung große Mengen Humus verloren gegangen sind. (Sanderman, Hengl, & Fiske, 2017, S. 9575-9580)

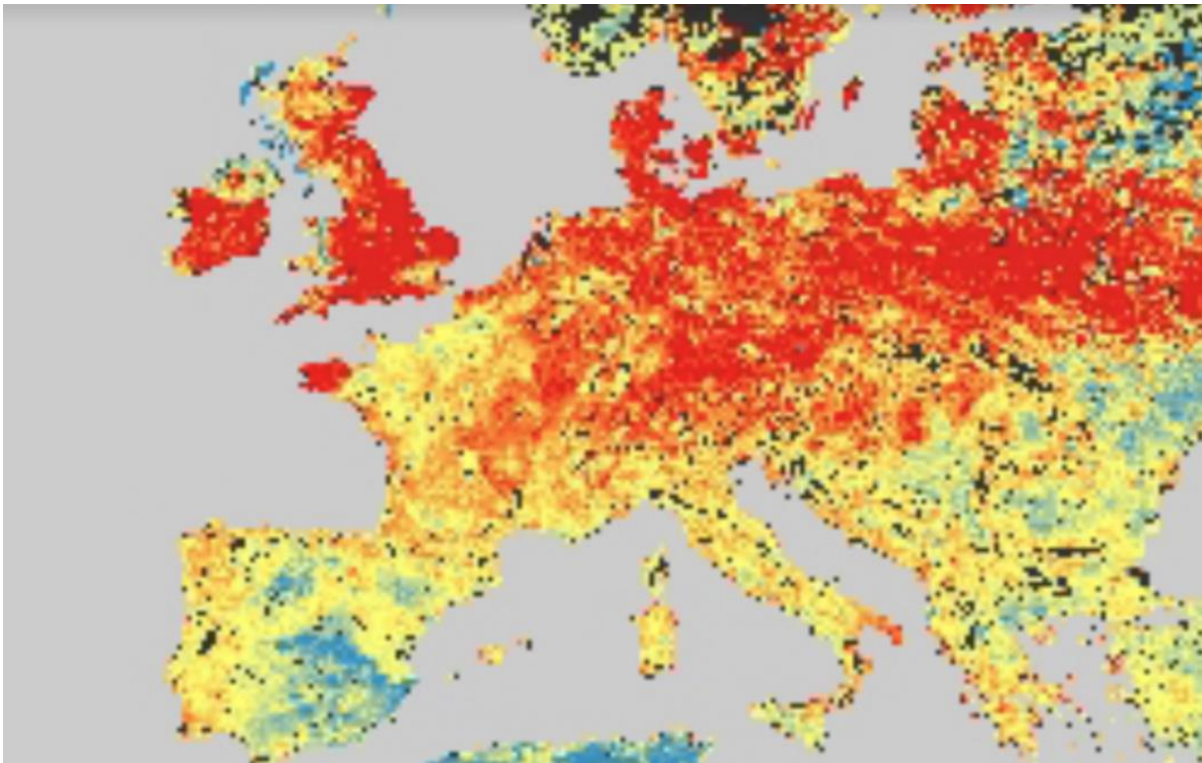


Abbildung 4: Kohlenstoff-Verluste in tC/ha in den vergangenen 200 Jahren in Europa (Sanderman, Hengl, & Fiske, 2017, S. 9577)

Für Österreich zeigt der obenstehende Kartenausschnitt einen Verlust von großteils 25 - 50 t C/ha (entnommen basierend auf der Färbung). Dies entspricht rund 43-86 t Humus/ha. Die Farben werden in der untenstehenden Abbildung, welche als Ergänzung zur oben angeführten Abbildung fungiert, erläutert.

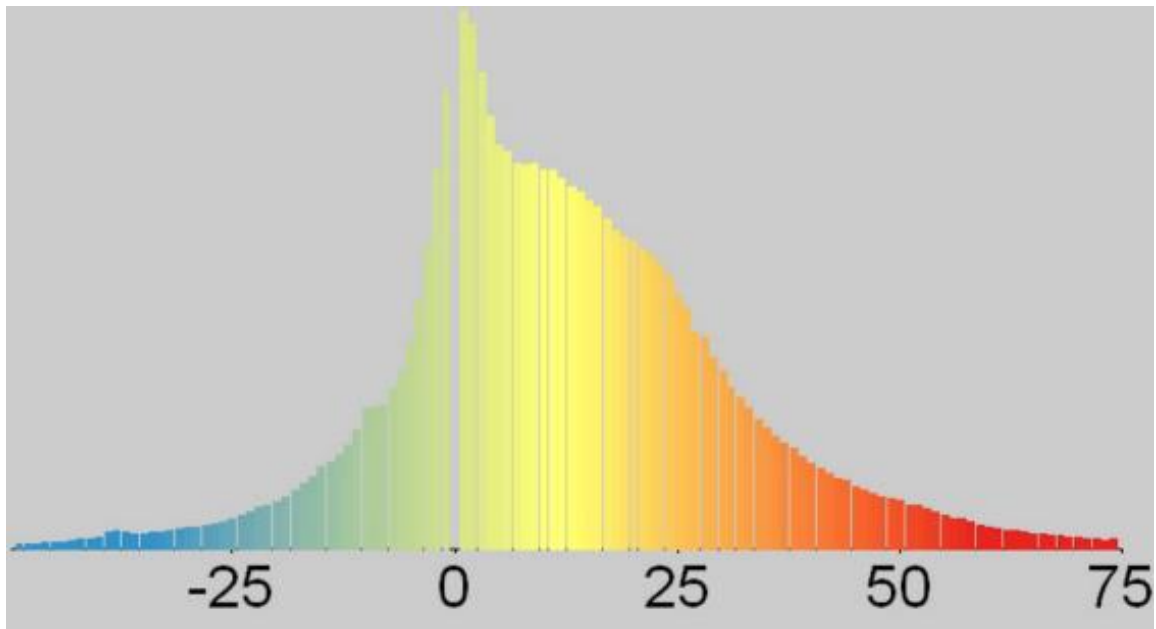


Abbildung 5: Kohlenstoff-Verluste in t/ha, wobei positive Abweichungen Kohlenstoff-Verluste entsprechen (Sanderman, Hengl, & Fiske, 2017, S. 9577)

Im oben angeführten Histogramm wird die Kohlenstoffentwicklung mit ihrer auf der Welt vorzufindenden Häufigkeit in Bezug gesetzt.

Durch unvorteilhaftes Boden-Management, wie auch unter Kapitel 3.4 beschrieben, kam es auch weltweit in den letzten Jahrzehnten zu einer drastischen Reduktion des Kohlenstoffanteils im Boden. Diverse Studien gehen größtenteils von Kohlenstoff-Verlusten von 20 bis 50 Prozent in Schwarzerdeböden aus. In den USA betrug beispielweise der Kohlenstoff-Verlust bei intensivem Maisanbau in den letzten 100 Jahren über 50 Prozent. (Gollany, et al., 2011, S. 234-246, zit. nach FAO and ITPS, 2021, S. 83)

Dies deckt sich mit den österreichischen Werten:

„Im Vergleich zu den 1930er-Jahren haben wir nur mehr ein Drittel bis maximal die Hälfte des ursprünglichen Humusvorrates im Boden. Durch eine Änderung der Bewirtschaftungsweise von Ackerflächen kann im Boden Humus aufgebaut, sowie langfristig stabilisiert werden und nicht als CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre entweichen.“ (Verein Humus+, kein Datum)

Auch durch den Menschen verübte Landnutzungsänderungen haben einen direkten Einfluss auf die Kohlenstoffvorräte im Boden und folglich auf die Kohlenstoffdioxidemissionen. Sowohl die Umwandlung von Grünland als auch die Umwandlung von Wald zu Ackerflächen korreliert

mit einer Veränderung der Menge an im Boden gespeicherten Kohlenstoff sowie mit der Herstellung eines neuen Kohlenstoff-Gleichgewichts in der Erde. Vergleichswert ist hierbei der ursprüngliche Kohlenstoffanteil im Boden vor der Umwandlung zu Ackerland. Die Ergebnisse beziehen sich auf die Umwandlung in gemäßigten Klimazonen wie Österreich. Wird Grünland zu Ackerland, tritt ein rascher relativer Kohlenstoff-Verlust des Bodens von durchschnittlich 36 % ein. Ein neues Kohlenstoffgleichgewicht pendelt sich bei einer mittleren Tiefe der Proben von 27 cm nach etwa 17 Jahren ein. Nach der Rodung eines Waldes und Umgestaltung einer solchen Fläche zu Ackerland werden rund 32 % des gespeicherten Kohlenstoffs im Boden in die Atmosphäre freigesetzt. Erst nach 23 Jahren wird ein neues Kohlenstoffgleichgewicht im Boden erreicht. Hauptgründe für den Kohlenstoff-Verlust bei der Umwandlung in Ackerland sind die Änderung des Mikroklimas und das Ausmaß von Bodenerosionen. Im Wald oder bei Grünland herrschen andere Bedingungen in Bezug auf Temperaturschwankungen und den Feuchtigkeitsgrad vor als auf Ackerflächen. Diese Werte sind etwa in Wäldern stabiler als auf Feldern. Ackerflächen verfügen über höhere Bodentemperaturen und eine stärkere Luftzirkulation, was die Zersetzungsrate zusätzlich erhöht. Dies resultiert in einem hohen Kohlenstoff-Verlust bei der Umwandlung in Ackerflächen. (Poeplau, et al., 2011, S. 2415-2424)

### **3.3.3. Veränderung des Humusgehalts in den letzten Jahrzehnten**

Die Entwicklung der Humusgehalte auf Ackerböden in verschiedenen Regionen Österreichs in den vergangenen 15 bis 25 Jahren konnte auf Basis von umfangreichen Humusdaten im Rahmen einer Evaluierung des ÖPUL (Österreichisches Programm für umweltgerechte Landwirtschaft) untersucht werden. Es sind knapp 38.000 Humusdaten miteinbezogen worden. Im Zeitraum zwischen 1991 und 1995, bevor die ÖPUL gegründet worden ist, und 2006 und 2009 ist eine Zunahme des Humusanteils im Boden zu verzeichnen. Die Hauptgründe für diese positive Tendenz liegen zum einen der Umsetzung der durch die ÖPUL festgelegten Maßnahmen und zum anderen der Prohibition des flächenhaften Verbrennens von pflanzlichen Stoffen, so auch Stroh, welches vor allem die Landwirtschaft betrifft, zugrunde. Zusätzlich hat das Ausmaß der Bodenbearbeitung allgemein abgenommen. Im Marchfeld ist der Humusanteil von durchschnittlich 2,6 % auf einen Mittelwert von 2,9 % angewachsen. Demnach ist der Humusgehalt in den letzten Jahrzehnten angestiegen. (Baumgarten, et al., 2012, S. 22-23)

### **3.4. Humuszehrende Faktoren**

Im Folgenden werden Aspekte aufgezeigt, welche den Humusaufbau erschweren, verhindern oder sogar zum Abbau beitragen. Dabei ist anzumerken, dass lediglich auf die durch die Landwirtschaft verursachten Einflüsse eingegangen wird, da diese den Großteil des Humusabbaus abbilden. Allgemein ist jedoch festzuhalten, dass der Humusabbau einem hauptsächlich anthropogenen Prozess unterliegt und somit auf das Verschulden menschlichen Handelns zurückzuführen ist.

#### **3.4.1. Kunstdünger**

Es ist notwendig, den Begriff Mineraldüngung in wasserlösliche Mineraldüngung, Synonym für Kunstdünger, und nichtwasserlösliche Mineraldüngung, etwa mithilfe von Gesteinsmehlen, zu differenzieren. Bei ersterer gelangt Stickstoff als Nitrat oder Ammonium in den Boden. Dies soll das Ausbringen von Kompost, welcher eine förderliche Wirkung auf den Humusaufbau darstellt, ersetzen. (Dunst, 2011, S. 84, 100-101)

Der Einsatz von Kunstdünger, meist in Form von Stickstoff-, Phosphor- und Kaliumsalzen, führt kurzfristig zu hohen Ertragssteigerungen, sofern dem Boden Mineralstoffe nicht in anderer Form zugeführt werden (Chaboussou, 1996, S. 124). Vor allem aufgrund des durch die wasserlösliche Mineraldüngung zugeführten Stickstoffes erfolgt jedoch ein rasantes Ansteigen des Salzanteils der Nährstoffe, was sich negativ auf den Boden und dessen Organismen auswirkt und die Bodenqualität beeinträchtigt. Dunst gibt weiters zu bedenken, dass wasserlöslicher Mineraldünger als Gegenspieler zum Kompost fungiert und bei gleichzeitigem Einsatz der humusaufbauenden Eigenschaft des Komposts stark entgegengewirkt. (Dunst, 2011, S. 84, 100)

Das wasserlösliche Nitrat weist die Begleiterscheinung auf, dass es aufgrund seiner Wasserlöslichkeit in das Grundwasser sickert und letztendlich zu einer Verunreinigung des Trinkwassers führt (BML, kein Datum). Dies hat gesundheitliche Auswirkungen auf den menschlichen und tierischen Körper. Im Verdauungstrakt findet die Umwandlung von Nitrat in das toxische Nitrit statt, indem das Nitrat um ein Sauerstoffatom reduziert wird. Das zu

reduzierende Sauerstoffatom kommt aus dem Hämoglobin im Blut, wodurch somit der Sauerstofftransport eingeschränkt wird. Bei Säuglingen kann dies Blausucht hervorrufen und zu Atemnot mit tödlicher Folge führen. (Hennig, 2011, S. 184) Im Gegensatz dazu verwendet die nichtwasserlösliche Mineraldüngung beispielsweise Gesteinsmehl, die eine positive Bodenentwicklung erreicht (Dunst, 2011, S. 84, 100).

Pro produzierte Tonne Stickstoffdünger wird etwa das doppelte Maß an Erdöl benötigt und zehn Tonnen Kohlenstoffdioxid ausgestoßen, wodurch bereits die Herstellung von Stickstoffdünger erhebliche Auswirkungen auf die Kohlenstoffdioxid- und später bei der Austragung auf die Felder auch auf Lachgasemissionen hat. (Scheub & Schwarzer, 2017, S. 36-37)

*„Stickstoffhaltiger Kunstdünger setzt bei seiner Produktion CO<sub>2</sub> frei und nochmals bei seiner Anwendung, weil er den Abbau von Bodenkohlenstoff fördert. Ein 50 Jahre andauernder Langzeitversuch an der Universität Illinois ergab: je höher der Anteil an künstlich applizierten Stickstoff, desto höher der Kohlenstoffverlust.“ (Khan, 2007, zit. nach Scheub & Schwarzer, 2017, S. 38)*

Kunstdünger ist nicht im Boden vorkommenden Ursprungs. Daher kann er laut Rusch auch nicht vom Boden einwandfrei aufgenommen und verwertet werden. Kunstdünger hemmt die Funktion der Wurzel, welche die Basis für Humusaufbau und die Fruchtbarkeit der Pflanze darstellt, und initiiert einen Rückgang der Bewurzelung. (Rusch, 2014, S. 76)

Die Pflanze geht mit den Mikroben im Boden eine Symbiose ein, wodurch alle Beteiligten profitieren. Die Wurzelexsudate, Ausscheidungsstoffe, die von der Pflanze in den Boden abgegeben werden, dienen den Bodenmikroorganismen als Nahrung. Dabei handelt es sich hauptsächlich um den durch Photosynthese gebildeten Zucker. Als Gegenleistung geben die Mikroben der Pflanze die benötigten Nährstoffe. Doch durch den Einsatz von Kunstdünger wird das organische Gleichgewicht zwischen Pflanze und Mikroben gestört, da der Boden in zu großen Mengen mit Stickstoff und anderen Nährstoffen angereichert wird. Das hat zur Folge, dass die Pflanze nicht mehr auf die humusaufbauenden Mikroorganismen angewiesen ist und es demnach zu einer Verringerung der Vielfalt an Bodenorganismen kommt. Schlussendlich führt dies zum Humusabbau. (EcoMind, Thomas Elssenwenger, 2016)

Zudem wirkt sich der Kunstdüngereinsatz auf die Bodenstruktur in Bezug auf die Porengröße aus. Durch Kunstdünger nehmen die kleinen Poren Überhand. Der Grund dafür ist, dass Kunstdünger zumeist nicht den exakt benötigten Mineralstoffbedarf des Bodens deckt, wodurch es zu Mängeln und Überschüssen bestimmter Mineralien kommt und eine Dysbalance der Stoffe im Boden entsteht. (Scheub & Schwarzer, 2017, S. 142-143) Kunstdünger, welcher sich lediglich auf die Zufuhr weniger bis einzelner Mineralstoffe beschränkt, hat keine humusförderliche Wirkung. Stattdessen hat die Verwendung von feinem Urgestein den Vorteil, eine Über- und Unterversorgung des Bodens mit Mineralstoffen zu verhindern, und kann den Humusaufbau unterstützen. (Rusch, 2014, S. 102)

### **3.4.2. Intensive Bodenbearbeitung**

Der Boden besteht aus unterschiedlichen Zonen, die verschiedene Eigenschaften und Bedingungen aufweisen. Die oberste Bodenschicht stellt andere Anforderungen, um zu bestehen, als tieferliegende Schichten. Mit der Tiefe geht eine Veränderung des Anteils an Sauerstoff, welcher mit jedem Zentimeter abnimmt, einher. Darüber hinaus vergrößert sich der vorzufindende Druck und der Wurzelbestand wird geringer. Die Temperatur nimmt einen stabilen Wert an und der Nässegrad wird konstanter. (Dunst, 2011, S. 86)

Bei einem Eingriff in den Boden durch landwirtschaftliche Geräte und Maschinen werden die verschiedenen Bodenschichten und ihre Ansprüche nicht explizit berücksichtigt und es wird eine Bearbeitungsmethode für das gesamte bearbeitete Erdreich herangezogen. Das wirkt sich nicht nur auf das Edaphon, sondern auch auf die schichttypischen Verhältnisse sowie den Humusgehalt aus und führt zu einer negativen Umgestaltung des Bodens. Insbesondere das Pflügen des Bodens und die Nutzung der Bodenfräse oder der Hacke greifen stark in die Biologie des Bodens ein. Eine Folge der genannten Bodenbearbeitungsmethoden ist das Absterben wichtiger Bodenorganismen, wie Bakterien, Pilze und Regenwürmer, welche unter anderem bei der Humusherstellung eine essentielle Rolle einnehmen und das Gleichgewicht wahren. Die Gefahr der Erosion des Bodens nimmt einhergehend mit einer instabilen Erdstruktur zu, welche anfällig für Wind und Regen ist. Durch die tiefe Bodenbearbeitung, die mehr als zehn Zentimeter in den Boden eingreift, vergrößert sich der Sauerstoffgehalt im

Boden. Durch das Umackern des Bodens vermischen sich Bodenzonen, welche mehr Sauerstoff besitzen, mit tieferen sauerstoffarmen Schichten. Dies führt zur Oxidation, was den Rückgang des Humus hervorruft. Folglich wird gespeicherter Kohlenstoff in Form von Kohlenstoffdioxid freigesetzt. (Dunst, 2011, S. 99-100)

### **3.4.3. Gülleausbringung**

Das Ausbringen von Exkrementen der Nutztiere und anderen Überresten der Landwirtschaft bewirkt ein großflächiges Ableben der zum Humusaufbau beitragenden Mikroben. Grund dafür ist der hohe Anteil an löslichem Stickstoff, Salz und Faulstoffen in der unbehandelten Gülle. Durch eine Veredelung der Gülle kann der Schaden minimiert beziehungsweise sogar ein Mehrwert geschaffen werden. (Dunst, 2011, S. 101)

In der Gülle werden durch die Einarbeitung von Gesteinsmehl oder Tonmineralien, welche eine hohe Aufnahmefähigkeit besitzen, Stoffe wie Stickstoff absorbiert, die sonst in den gasförmigen Zustand übergehen und in die Atmosphäre gelangen würden. Die Aktivität der Mikroorganismen wird intensiviert, umweltbelastende Stoffe der Gülle werden gebunden. Zusätzlich wird der Boden durch die Mineralien angereichert. Somit kann die Gülleausbringung in Kombination mit Gesteinsmehl oder Tonmineralien auch eine humusaufbauende Wirkung haben. (Danner, 2019)

### **3.4.4. Monokulturen**

Monokulturen gehören zu den humuszehrenden Faktoren. Der stete Anbau der immer gleichen Pflanzen führt zu einer monotonen Bewurzelung des Bodens. Durch den übermäßigen Bedarf der gleichen Nähr- und Mineralstoffe wird der Boden ausgezehrt. Daraus resultiert ein einfältiges Edaphon. Somit kann Humus, der sich durch seine Diversität an Bodenbewohnern auszeichnet, weder entstehen noch bestehen. Weiters liegt in Monokultur bewirtschafteter Boden zumeist über die Wintermonate unbestellt. Fehlt über einen Zeitraum Bewuchs, bilden sich keine Wurzeln und humusbildende Bodenorganismen gehen zugrunde. (Dunst, 2011, S. 99)



### **3.4.5. Pestizide**

Der Einsatz von Pestiziden hat eine destabilisierende Einwirkung auf die Mikroorganismen im Boden. Bei erneuter Verwendung von Pestiziden kann es aufgrund wiederholter Schwächung zu einem Verenden der gesamten Mikroorganismen kommen und der Humusabbau schreitet fort, bis nahezu kein Humus mehr vorzufinden ist. (Dunst, 2011, S. 102)

„Fungizide schädigen Mykorrhiza-Fäden, die Pflanzen ernähren und den Boden zusammenhalten[...]. Boden erodiert, CO<sub>2</sub> wird freigesetzt.“ (Scheub & Schwarzer, 2017, S. 38)

## **3.5. Humusaufbauende Faktoren**

Es existieren eine Reihe von Aspekten, die zum Aufbau von Humus beitragen können. Im Fokus stehen, wie bereits im Kapitel 3.4 begründet, die Verbesserungsvorschläge für die Landwirtschaft. Die folgenden Unterkapitel sollen insbesondere die Pflanzendiversität am Acker, aber auch humusförderndes Bodenmanagement als Beitrag zum Humusaufbau durchleuchten, denn unterschiedliche Pflanzen haben ein vielfältiges Wurzelreich zur Folge. Dieses entspricht wiederum einer Vielfalt an Mikroorganismen und infolgedessen wird Humusaufbau erreicht.

### **3.5.1. Fruchtfolge**

Der Anbau von derselben Sorte über Jahre hinweg beziehungsweise die ausschließliche Nutzung von starkzehrenden Pflanzen lässt keinen Humusaufbau, etwa aufgrund der fehlenden Diversität an Pflanzen, Wurzeln und Mikroben zu. Durch die Fruchtfolge variiert die Saat, um Humus aufzubauen und zu stabilisieren. (Dunst, 2011, S. 91)

### **3.5.2. Mischkulturen**

Das Erzielen von einer abwechslungsreichen Bewurzelung mit dem Ziel des Humusaufbaus kann zudem durch den Anbau von zwei oder mehr Sorten am Feld zur selben Zeit erzielt werden. Diese Anbaumethode wird Mischkultur genannt. Zumeist wird ein Trennen der Sorten erst nach der Ernte durchgeführt. Werden gleichzeitig mindestens zwei Sorten angebaut, kann es zu positiven Synergien kommen. Dunst zufolge kann bei einer

durchdachten Wahl der Sorten sogar eine Ertragssteigerung bewirkt werden, was somit einen positiven Nebeneffekt für Landwirtinnen und Landwirte widerspiegelt. (Dunst, 2011, S. 92)

### **3.5.3. Untersaaten**

Die Methode der Untersaaten basiert auf dem Anbau von zwei verschiedenen Pflanzen. Eine der beiden stellt die Hauptsorte da. Die andere niedrigwachsende Sorte dient nicht zur Ernte, sondern bewahrt das Feld vor dem Brachliegen. Folglich existieren das ganze Jahr Wurzeln und Mikroorganismen können ganzjährig bestehen. Der Anbau einer zweiten Sorte, wie bereits im oberen Absatz erwähnt, trägt zu einer vielfältigen Bewurzelung und Mikrobendiversität bei, sodass Humus aufgebaut werden kann. Zugleich verdrängt die Nebenkultur unerwünschtes Unkraut. Ohne Nebenkultur würde es den Einsatz von Mikroorganismen abtötenden, demnach humusabbauenden Herbiziden verlangen. (Dunst, 2011, S. 92-93)

### **3.5.4. Gründüngung**

Mit Gründüngung wird ein gezielter Aufbau von Humus durch Aussaat von Pflanzen, die Stickstoff und andere Nährstoffe in den Boden eintragen, verstanden, die damit zur Regeneration des Bodens beitragen. Damit Gründünger am wirksamsten Humus aufbaut, muss er insbesondere Hülsenfrüchte sowie kleeartige Pflanzen, etwa Luzerne, beinhalten. Der Einsatz von Luzerne schafft des Weiteren eine Bewurzelung, die bis in tiefe Erdschichten reicht. Diese sogenannten Leguminosen nehmen Stickstoff aus der Luft auf. Das ist für den Humusaufbau notwendig, da sich Humus zu sechs Prozent aus Stickstoff zusammensetzt und demnach für neuen Humus neuer Stickstoff erforderlich ist. (Dunst, 2011, S. 90)

### **3.5.5. Winterbegrünung**

Die Winterbegrünung, also das Wachsen von Pflanzen auf dem Feld auch über den Winter, ermöglicht den Mikroben ein Bestehen. Bodenorganismen beziehen dabei ihre Nahrung über Wurzelexsudate. Durch die Begrünung kann der Boden weiterhin Nährstoffe aufnehmen, welche für die im Frühjahr gesäte Kultur genutzt werden können. Die Reichhaltigkeit von Mikroorganismen geht mit der Bildung von Humus einher, welcher Erosionen vorbeugt. Ohne Winterbegrünung, demnach ohne Bewurzelung, bleibt ein wesentlicher Teil der Nährstoffe

nicht im Boden. Zum einen geschieht das, weil ohne Wurzeln kein Humus mit seiner Krümelstruktur besteht und die oberste Bodenschicht, in der die Nährstoffe vorzufinden sind, durch Niederschlag und andere Witterungseinflüsse abgetragen wird. Zum anderen gelangen die Nährstoffe ohne bindende Pflanzen- und Wurzelschicht in die Atmosphäre und die Mikroben sterben ab. (Verein Humus+, kein Datum)

### **3.5.6. Agroforstsysteme**

Agroforstsysteme vereinen die Landwirtschaft mit forstwirtschaftlichen Elementen. Neben dem Säen der Samen von Ackerpflanzen nimmt bei Agroforstwirtschaften das Pflanzen von Bäumen und Hecken auf den Feldern eine wichtige Rolle ein. Dabei werden die Bäume in regelmäßigen Entfernungen zumeist in Baumgürteln angepflanzt. Weltweit wird auf rund zehn Millionen Quadratkilometern Fläche Agroforstwirtschaft betrieben. Diese parallele Bepflanzung von Saat und Gehölz wird insbesondere in Gebieten um den Äquator praktiziert. Die Dauer des Baum- und Heckenbestandes ist nicht festgesetzt. Je nachdem welche Gehölzart gesetzt wird, können beispielsweise die Früchte von Obst- und Nussbäumen ebenfalls geerntet und das Holz nach dem Fällen als Brennstoff genutzt werden, weshalb es den Bäuerinnen und Bauern auch wirtschaftliche Vorteile bringt. Bäume und Sträucher bieten der angebauten Ackerkultur Schutz vor Erosion und Witterungseinflüssen wie Stürmen. Zudem wird eine verbesserte Speicherfähigkeit von Wasser erzielt, was vor allem in Bezug auf die Klimakrise einen erwünschten Nebeneffekt darstellt. Darüber hinaus verbessern Bäume und Hecken die Artenvielfalt, indem sie Nistplätze für Vögel und Fledermäuse bereitstellen, welche der Bekämpfung von tierischen Schädlingen wie Insekten und Käfern dienen. Folglich wird der Einsatz von Pestiziden reduziert, sodass die Bodenbiologie nicht geschwächt wird und Humus dauerhaft bestehen kann. (Scheub & Schwarzer, 2017, S. 160-161)

Abgesehen von der Kohlenstoffdioxidbindung durch die Wurzeln der Bäume ist auch allgemein eine tiefere Bewurzelung, demnach ebenso eine vielfältigere Bodenbiologie als Grundvoraussetzung zum Humusaufbau, möglich. Auf diese Weise beziehen Bäume wichtige Nährstoffe sowie Wasser aus tieferliegenden Bodenschichten, die sonst ungenutzt bleiben würden. Der Nährstoff- und Wasserkreislauf schließt sich, indem abgefallene Blätter und das verbesserte Mikroklima durch verdunstetes Wasser die entzogenen Stoffe in den Boden

zurück abgeben. Durch die verbesserte Humusbilanzierung und die Synergieeffekte können die Ernteerträge bis auf 140 Prozent angehoben werden. Beim Roden der Bäume kann aus einem kleinen Teil der überbleibenden Wurzeln Humus gebildet werden. (Dunst, 2011, S. 93-94)

### **3.5.7. Minimalbodenbearbeitung**

Die Minimalbodenbearbeitung repräsentiert eine minimalistisch gehaltene Bodenbearbeitung, die sogar bis zur Nullbodenbearbeitung reichen kann.

„Bei der Nullbodenbearbeitung verzichtet man vollständig auf jede Art der Bodenbearbeitung – das Saatgut wird mittels Schlitzsaat direkt in die Mulchdecke der Vorkultur eingebracht.“ (Dunst, 2011, S. 94)

So kann neben dem Energieverbrauch auch die Kohlenstoffdioxidfreisetzung, etwa durch Pflügen, eingeschränkt werden. In Kombination mit dem Beachten einer Fruchtfolge und dem Einsatz von Untersaaten kann Unkraut auf schonende, humuserhaltende Weise reduziert und auf den Einsatz von Pestiziden verzichtet werden. (Dunst, 2011, S. 94-95)

Ein im Jahr 2002 von Paul Mäder gestartetes Experiment hat bei pflugloser Bearbeitung eines Ackers eine erhöhte Fruchtbarkeit und einen gesteigerten Humusgehalt bei teilweise reduzierten Ernteerträgen nachgewiesen. Dabei ist ein Acker aus biologischer Landwirtschaft in einen mit Pflug bearbeiteten und einen ohne Pflug bearbeiteten Abschnitt geteilt und gegenübergestellt worden ist. Mäder zufolge ist nach 36 Monaten beim pfluglos bearbeiteten Sektor eine Steigerung des Humusgehalts von acht Prozent verzeichnet worden. Nach weiteren 36 Monaten ist im Vergleich zum Anfangswert des Humusgehalts ein Fünftel mehr Humus vorhanden gewesen. (Maurin, 2009) Der Ausgangswert des organischen Kohlenstoffs auf den Anbauflächen des Experiments hat 2,2 % betragen (Berner, Frei, & Mäder, 2005, S. 259-260). Dies entspricht 3,8 % Humusanteil im Boden.

### **3.5.8. Kompost als Düngemittel**

Wie in Kapitel 2.1.2 erwähnt, besitzt Kompost eine humusfördernde Wirkung. Die Zusammensetzung sowie die Menge des Komposts sollten in Abstimmung auf den Boden

erfolgen, um den bestmöglichen Aufbau von Humus zu erzielen. In Berufung auf Dunst gilt grundsätzlich, dass die Aufnahme von Kompost nicht uneingeschränkt möglich ist. Bis zur Sättigung kann durchschnittlich jeder Hektar Boden 150 Kubikmeter Kompost aufnehmen. Aufgrund geringer Komplexität kann die Produktion des Komposts durch Maschinen direkt bei den Bäuerinnen und Bauern erfolgen. Mithilfe der Beimpfung des Bodens mit Kompost kann in kurzer Zeit ein wesentlicher Humusaufbau erreicht werden. (Dunst, 2011, S. 98)

*„Durch die Kompostanwendung wird der Boden mit stabilem Humus angereichert und die Mikrobiologie in Schwung gebracht.“* Der aufgetragene Kompost bewirkt perfekte Voraussetzungen, damit die Mikroorganismen bestehen können. (Dunst, 2015, S. 12)

*„Die Vorteile, die sich mit der Verwendung von Kompost ergeben, sind die Stabilisierung der Bodenstruktur, die Verbesserung des Luft-Wasserhaushalts, die Förderung des Bodenlebens und eine beständige Nährstofffreisetzung (z. B. Stickstoff-Nachlieferungsvermögen).“* (AGES, kein Datum)

### **3.5.9. Optimales Vorgehen**

Um Humus bestmöglich aufzubauen und effizient Kohlenstoff zu speichern, empfiehlt sich eine Kombination der in den vorigen Unterkapitel erläuterten Faktoren. Zum einen ist die ganzjährige Begrünung, so auch in den Wintermonaten, sicherzustellen. Zum anderen sind das Erreichen einer vielfältigen Bewurzelung, Bepflanzung, Diversität an Mikroorganismen sowie minimale Bodenbearbeitungstechniken elementar. (Scheub & Schwarzer, 2017, S. 105)

## **4. Möglicher Beitrag des Humus als Kohlenstoffsенke**

Im IPCC Report 2022 wird die Kohlenstoffsequestrierung in der Landwirtschaft als eine der Hauptpotenziale zur Reduzierung der Treibhausgase gesehen. Dies zeigt auch die internationale Bedeutung von Humusaufbau, um der Klimakrise entgegenzuwirken.

Many options available now in all sectors are estimated to offer substantial potential to reduce net emissions by 2030. Relative potentials and costs will vary across countries and in the longer term compared to 2030.



Abbildung 6: Geschätzter Einfluss verschiedener treibhausgasreduzierender Ansätze (IPCC Sixth Assessment Report, 2022, S. SPM-50)

#### 4.1. Dekarbonisierung oder Rekarbonisierung?

Wenn es wieder zu Kohlenstoffbindung kommt, kann also durchaus nicht nur von Dekarbonisierung, sondern sehr wohl auch von Rekarbonisierung, also der erneuten Bindung

von zuvor in Form von CO<sub>2</sub> entwichenem Kohlenstoff, gesprochen werden. Auch die FAO, die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen, spricht in diesem Fall von „*Recarbonizing global soils*“. (FAO and ITPS, 2021)

## 4.2. Relevanter österreichischer Ackerboden

Die untenstehende Grafik zeigt die Bodennutzung in Österreich. Diese Arbeit konzentriert sich dabei auf das Ackerland, wobei auf den anderen hier angeführten Flächen ebenfalls Humusaufbau erfolgen könnte.

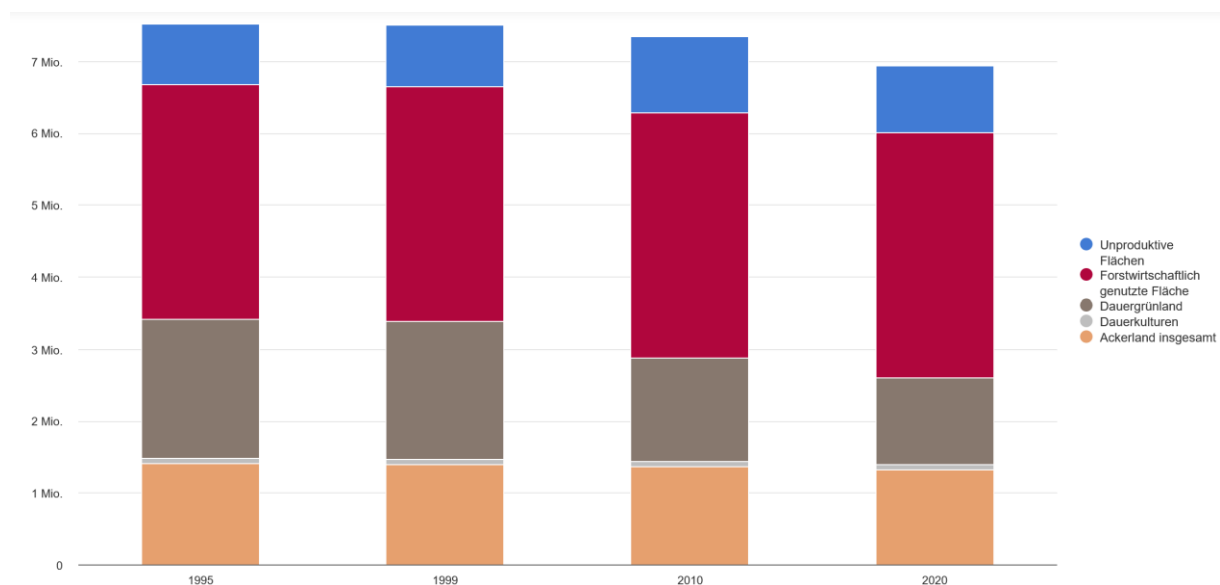


Abbildung 7: Bodennutzung Österreichs in ha (Statistik Austria, 2022)

Laut Statistik Austria trägt das österreichische Ackerland 2020 mit 1.322.912 ha zur gesamten Bodennutzung bei. Diese Fläche dient als Basis der Potenzialberechnung unter Kapitel 5.

## 4.3. Aktuell genutzte Ansätze zur Kohlenstoffberechnung in Österreichs Böden

### 4.3.1. Austrian Carbon Calculator

Unter der Projektleitung des Umweltbundesamtes wurde zwischen 2012 und 2015 der Austrian Carbon Calculator, ein Modell zur Ermittlung des Humusgehalts in den Ackerflächen Österreichs, geschaffen. Dabei wurden 1991/92 sowie 2012 50 Standorte beprobt und die bisherigere Bewirtschaftungsart sowie die regionalen Besonderheiten erhoben. Auf Basis der

regionalen Gegebenheiten kann der Einfluss einzelner Ansätze wie Fruchtfolge, Ernterückstände, Dauerbewuchs, Bodenbearbeitung und Düngemittel auf den Humusgehalt ermittelt werden. (Umweltbundesamt, 2015)

#### **4.3.2. Austrian Soil Carbon Sequestration Map: Kohlenstoff in Österreichs Böden**

Das Projekt ASOCseq (Austrian Soil Organic Carbon Sequestration Map), also die Karte des Potenzials österreichischer Böden zur Sequestrierung von organischem Kohlenstoff, wurde von der FAO ins Leben gerufen und dient dazu, das Potenzial der österreichischen landwirtschaftlichen Böden zur Bindung von Kohlenstoff im Boden aufzuzeigen. (Haslmayr, et al., 2022, S. 10) Im Projekt ASOCseq werden verschiedene Szenarien gegenübergestellt. Die hier dargestellten Zahlen beziehen sich auf die detaillierten österreichischen Daten aus dem Jahr 2020. Der Kohlenstoffanteil für die Hälfte der Kohlenstoffvorräte Österreichs liegt dabei zum Ausgangszeitpunkt zwischen 39 und 96 t C/ha. Die entsprechende Grafik findet sich unter Kapitel 3.3.1. Dies entspricht einem durchschnittlichen Humusgehalt zwischen 67 und 166 t pro Hektar. (Haslmayr, et al., 2022, S. 6-7)

Die Karten zur durchschnittlichen jährlichen Kohlenstoffsequestrierung zeigen, dass sich alle Werte zwischen -0,93 und 1,5 tC/ha befinden. In der Studie werden vier Szenarien berechnet, „BAU“, „Low C-Input“, „Medium C-Input“ und „High C-Input“. Exemplarisch werden untenstehend zwei Szenarien, „BAU“ (Business as Usual) und Szenario „High C-Input“ (Gesamt-Applikation von 20 t C/ha), und die Entwicklung 2020 bis 2040 dargestellt. (Haslmayr, et al., 2022, S. 38-58)



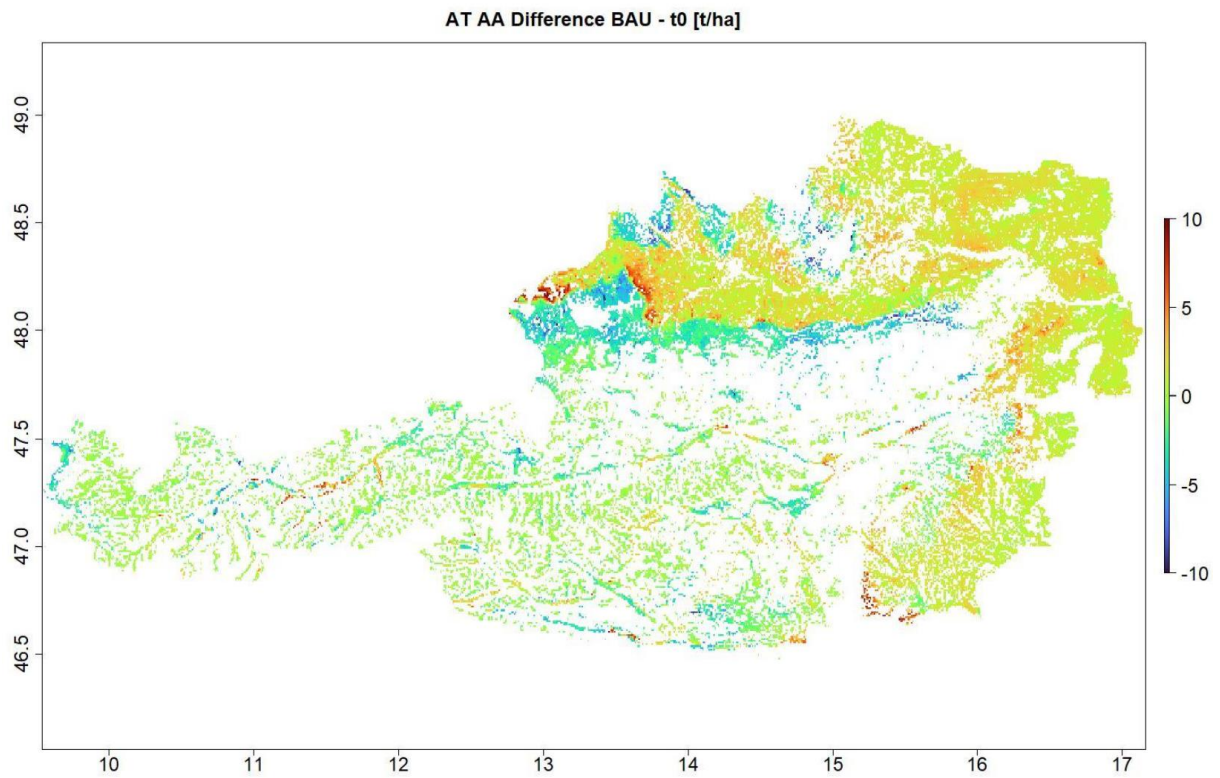


Abbildung 8: Karte mit der Differenz der Kohlenstoffvorräte zwischen dem "BAU"-Szenario im Jahr 2040 und des Ausgangsvorrats 2020 in t C/ha (Haslmayr, et al., 2022, S. 42)

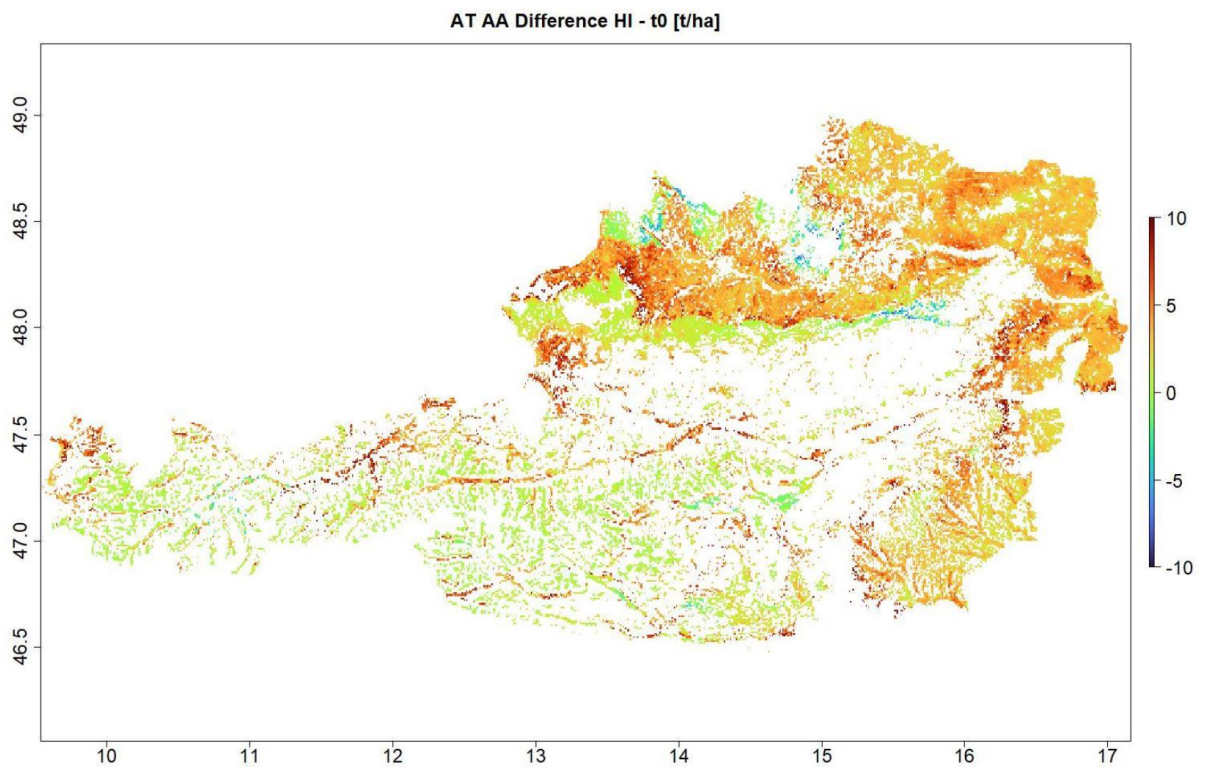


Abbildung 9: Unterschied der Kohlenstoffvorräte vom Ausgangswert in 2020 in t C/ha und dem mittels "High C-Input" Szenario vorhergesagten Wertes für 2040 (Haslmayr, et al., 2022, S. 57)

Zusammenfassend kommt die Studie auf einen Anfangs-Kohlenstoffwert zum Zeitpunkt  $t_0$  (2020) von 39 bis 96 t C/ha (Haslmayr, et al., 2022, S. 36).

„Dabei ergaben die Modellierungen auf Basis der detaillierten österreichischen Daten jeweils die geringsten Steigerungen (BAU: 43 - 70 tC/ha; Low: 43 - 71 tC/ha; Medium: 44 - 72 tC/ha; High: 45 - 74 tC/ha). Insgesamt gibt es also nur sehr geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Szenarien.“ (Haslmayr, et al., 2022, S. 7)

Weiters bietet die Studie Detailauswertungen zu einzelnen österreichischen Regionen für die vier Szenarien, hier am Beispiel Marchfeld verdeutlicht.

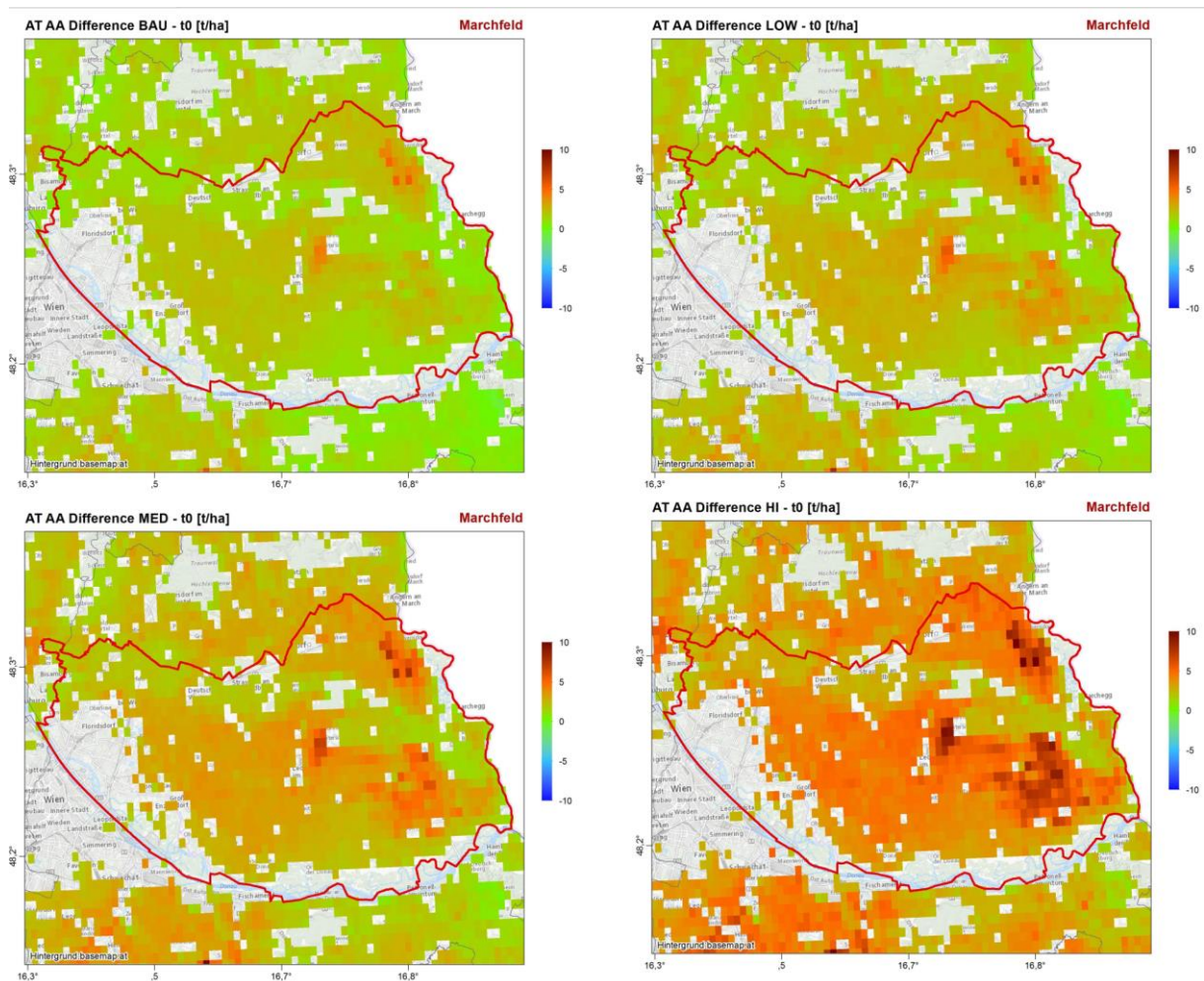


Abbildung 10: Vergleich der vier Szenarien in t C/ha anhand des Beispiels Marchfeld (Haslmayr, et al., 2022, S. 60)

Damit ergeben sich aufgrund der jeweiligen Umweltvariablen (Klima-, Boden- und Landnutzungsdaten) Ansätze, wo Humusaufbau leicht beziehungsweise eher schwierig erfolgen kann. (Haslmayr, et al., 2022, S. 27)

#### **4.4. Wieviel C-Sequestrierung ist möglich? Modell „Humus+“**

Das Projekt Humus+, initiiert von der Ökoregion Kaindorf in der Steiermark, die auch Veranstalter der national und international beachteten Humustage sind, setzt sich zur Aufgabe, in möglichst kurzer Zeit die Qualität der Böden zu verbessern und Humus aufzubauen:

„Ziel ist die Förderung von Humusaufbau und die Ökologisierung des Landbaus! Durch den damit verbundenen Einbau von CO<sub>2</sub> in den Boden bietet sich eine riesige Chance im Kampf gegen den Klimawandel. Doch nicht nur das! Durch Humusaufbau werden unsere Böden stabiler und können ein Vielfaches an Wasser aufnehmen, Abschwemmungen werden vermieden und Trockenperioden können leichter überstanden werden.“ (Verein Humus+, kein Datum)

Mittels Vereinbarung mit einzelnen Landwirtinnen und Landwirten streben diese für fünf bis sieben Jahren an, Humus auf einer landwirtschaftlichen Fläche aufzubauen. Humus+ empfiehlt dabei ganzjährige Begrünung des Ackers, Verzicht auf den Pflug in Bezug auf die Bearbeitung des Bodens, Gründüngung, Agroforstsysteme, Kompost, minimierte chemische Düngung sowie eine Reduzierung des Pestizideinsatzes. Jeder Landwirt, der Humus aufbaut, erhält 30 Euro pro Tonne eingespartem Kohlenstoffdioxid. Die Basis bildet dafür eine Bodenuntersuchung in null bis 25 Zentimeter Tiefe im Boden. (Verein Humus+, kein Datum) Die Kosten werden über Humus-Plus-Zertifikate finanziert, die von Unternehmen, die der Nachhaltigkeit einen Stellenwert zuschreiben, erworben werden (Verein Humus+, kein Datum). So sind bis 2021 bereits 410.000 Euro an teilnehmende Humusbauern ausbezahlt worden (Verein Humus+, kein Datum). Die exakte Berechnung, ausgehend vom Humusanteil in der Bodenprobe bis zur zertifizierten CO<sub>2</sub>-Bindung, findet sich in nachfolgender Tabelle.

Was wird berechnet?	Einheit	Erklärung	Berechnung	Ergebnis
Fläche	m <sup>2</sup>	1 ha =10 000m <sup>2</sup>		10 000 m <sup>2</sup>
Bodenvolumen	m <sup>3</sup>	Beprobungstiefe 0,25m	10 000 x 0,25 =	2 500 m <sup>3</sup>
Feinboden-Volumen	m <sup>3</sup>	Grobskelettanteil (Steine,etc.) muss abgezogen werden. Bei 5% Grobanteil, folglich 95% Feinboden.	2 500 x 0,95 =	2 375m <sup>3</sup>
Spezifisches Gewicht	t/m <sup>3</sup>	Abhängig vom Humusgehalt. Bei 1% Humus: 1,5 (t/m <sup>3</sup> )	2 375 x 1,5 =	3 563 t/m <sup>3</sup>
Humusgehalt	t	Humusgehalt (t) bei 1 % Humus	3 563 x 0,01 =	35,63 t
Kohlenstoffgehalt	t	Humus besteht zu 58% aus Kohlenstoff	35,63 x0,58 =	20,67 t
CO <sub>2</sub> - Gehalt	t	Die Umrechnung von „C“ zu „CO <sub>2</sub> “ erfolgt mit dem Faktor 3,67	20,67 x 3,67 =	75,9 t

Tabelle 2: Berechnung der CO<sub>2</sub>-Bindung des Projekts Humus+ (Verein Humus+, kein Datum)

Wenn während des Zeitrahmens der Humusanteil eines Landwirts mit angemeldeten 10 ha zum Beispiel von 1,0 % auf 1,7 % steigt, trägt er laut obiger Tabelle mit der Bindung von 531 t CO<sub>2</sub> zur Rekarbonisierung bei. Näherungsweise errechnet sich dies aus 35.630 t spezifisches Gewicht (10 ha) x 0,7 % x Humusaufbau x 58 % Kohlenstoff x Faktor 3,67 für die Umrechnung von C auf CO<sub>2</sub>. Der Landwirt würde in diesem Beispiel 15.930 EUR (531 t x 30 EUR) Erlösen.

Der Durchschnittswert der erzielten Humusmehrung der letzten Jahre im Projekt Humus+ beträgt 6 t Humusaufbau pro ha und Jahr (Hahn, 2022).

Bei einer entsprechend höheren CO<sub>2</sub>-Bepreisung von 100 EUR/t oder mehr und entsprechender Bonifikation für Landwirte, die Humusaufbau betreiben, könnte dies künftig eine wichtige Einnahmenquelle für Österreichs Bäuerinnen und Bauern darstellen und damit der Klimakrise aktiv entgegensteuern.

## 5. Potenzialanalyse: Wie viel Rekarbonisierung ist möglich?

### 5.1. Klimaschutzzielpfad für Österreich

Um die österreichischen Klimaschutzziele - insbesondere Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 - im Vergleich zu 1990 zu erreichen, darf der maximale CO<sub>2</sub>-Ausstoß 700 Millionen t betragen. Das Grazer „Wegener Center für Klima und Globalen Wandel“ hat dazu einen Klimaschutzpfad ermittelt. (Hirtenfellner, 2020)

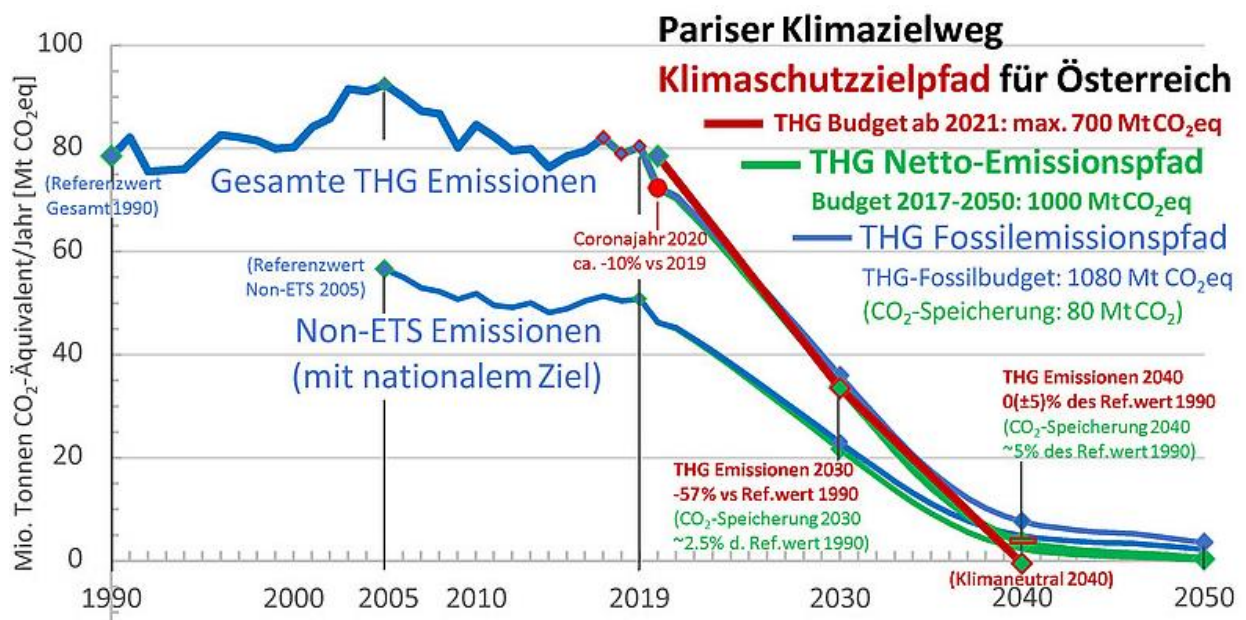


Abbildung 11: Klimaschutzzielpfad für Österreich zur Klimaneutralität bis 2040 (Hirtenfellner, 2020)

Dabei müssen bis 2030 pro Jahr 4,5 Mt (Megatonnen) CO<sub>2</sub> und zwischen 2031 und 2040 pro Jahr 3,4 Mt CO<sub>2</sub> eingespart werden. Um diese angeführte Abnahme der Kohlenstoffdioxidemissionen umzusetzen, ist eine Reduktion des Ausstoßes fossiler Energieträger von mehr als 90 % unabdingbar. Das Wegener Center hält dazu fest: „Darüber hinaus ist der Aufbau von nachhaltiger Bodenkohlenstoffspeicherung in der Landwirtschaft essentiell.“ (Hirtenfellner, 2020)

## 5.2. Berechnungsbasis für Rekarbonisierungspotenzial

Wie unter Kapitel 4.2 ersichtlich ist, beträgt die Ackerfläche in Österreich 1.322.912 ha. Unter Kapitel 4.3.2 wurde im Projekt ASOCseq dargelegt, wie viel Kohlenstoff, daraus abgeleitet Humus, aktuell in Österreichs Ackerflächen gebunden ist.

Der durchschnittliche Kohlenstoffanteil beträgt 62,4 tC/ha (Baumgarten, et al., 2021, S. 4). Dies ergibt einen durchschnittlichen Humusanteil von rund 108 t/ha. (62,4 tC/ha dividiert durch 58 % Kohlenstoffanteil im Humus). Unter Kapitel 4.4 wurde mit Humus+ ein in Österreich seit vielen Jahren erfolgreich eingesetztes Modell beschrieben, welches Humus-Aufbau über Humus-Plus-Zertifikate bonifiziert.

Wie oben bereits angeführt betragen die bei Humus+ durchschnittlich erreichten Humuszunahmen 6 t pro Hektar und Jahr (Hahn, 2022). Dieser Wert wird als Basis für die nachfolgenden Berechnungen herangezogen. Die hier angewandte Methodik kombiniert die zur Verfügung stehende Agrarfläche Österreichs mit dem aktuellen durchschnittlichen Humusgehalt und ermittelt, basierend auf den bisherigen Ergebnissen des langfristigen empirischen Projektes Humus+, eine Abschätzung eines möglichen Humusaufbaus. Dieses Projekt wird herangezogen, da beide Ebenen, sowohl die Produktion qualitativ hochwertiger Lebensmittel mit einhergehendem Humusaufbau als auch die monetäre Ebene durch die Humus-Plus-Zertifikate für gebundenes CO<sub>2</sub>, inkludiert sind. Zu erwähnen ist, dass beim hier verwendeten Ansatz, wie im Projekt ASOCseq, die Bodenschicht 0-30 cm als Basis verwendet wird, während bei Humus+ die Bodenschicht 0-25 cm für die Analyse des Humusanteils herangezogen wird. Aus Vereinfachungsgründen wurde die Annahme getroffen, dass der Humusaufbau bereits im ersten Jahr voll einsetzt.

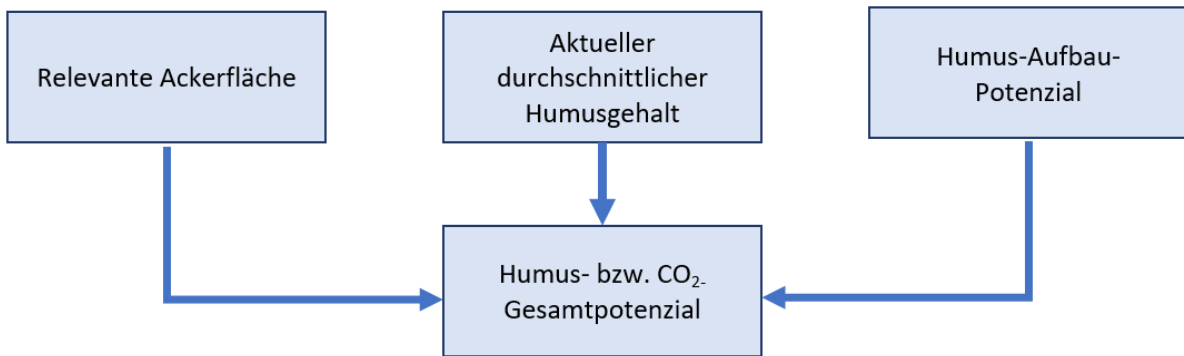


Abbildung 12: Ansatz zur Ermittlung des Humus- beziehungsweise CO<sub>2</sub>-Gesamtpotenzials

In dieser ersten Potenzialanalyse soll nun aus oben beschriebenen Ansätzen abgeleitet werden, wie viel Humus bei einer entsprechenden Bonifizierung aufgebaut beziehungsweise CO<sub>2</sub> theoretisch gebunden werden könnte. In einem weiteren Schritt werden die ermittelten Zahlen in Relation zum maximalen CO<sub>2</sub>-Ausstoß laut Klimaschutzzielpfad des Wegener Centers für die nächsten zwanzig Jahre, wie unter Kapitel 5.1 erläutert, gesetzt. Die hier getroffenen Annahmen verfolgen das Ziel, durch einen einfachen Quantifizierungsansatz erste Zahlen abzuleiten.

### 5.3. Humusaufbaupotenzial als Kohlenstoffsenke

Basierend auf einer Gesamt-Ackerfläche in Österreich von 1.322.912 ha ergibt sich eine jährliche Humuszunahme von 7,94 Mt ( $1.322.912 \text{ ha} * 6 \text{ t Humusaufbau/ha/J}$ ). Dies entspräche bei 20 Jahren Betrachtungszeitraum (2021–2040) einem potenziellen Humusaufbau von 120 t/ha. Für die gesamten landwirtschaftlichen Flächen in Österreich wird dieser Wert in dieser Arbeit als Maximalwert, Szenario „Maximal“, gesehen. Um einen „realistischen“ Sollwert darzustellen, wird ein Korrekturfaktor angewendet. Die hier eigene getroffene Annahme für den Sollwert liegt bei 25 % des Maximalwerts und wird als Szenario „Real“ bezeichnet: Dies bedeutet, dass entweder ein Viertel der österreichischen Böden 6 t Humusaufbau pro Hektar und Jahr erreichen oder alle betrachteten Böden jeweils ein Viertel der 6 t Humusaufbau, also 1,5 t Humusaufbau pro Hektar und Jahr erzielen. Der durchschnittliche Humusaufbau bezogen auf die gesamte Ackerfläche beträgt somit in beiden Fällen 1,5 t pro Hektar und Jahr.

Die hier angenommene Betrachtungsperiode beträgt 2021 bis 2040, also 20 Jahre.

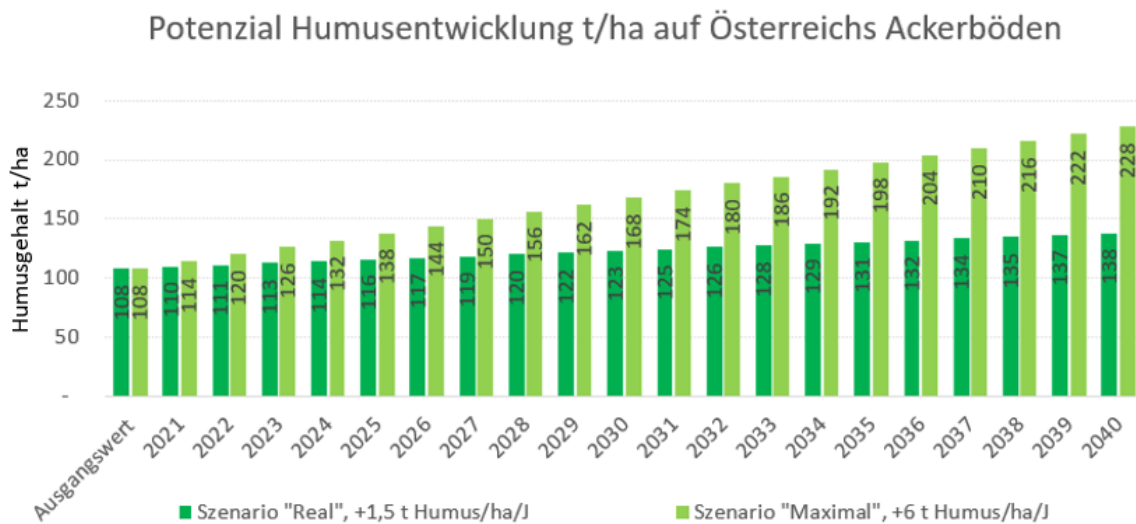


Abbildung 13: Potenzial Humusentwicklung auf heimischen Ackerböden

Der durchschnittliche Humusanteil pro Hektar auf heimischen Ackerböden würde sich demnach von 108 t/ha im Jahr 2020 um 120 t (+111 %) auf 228 t (Szenario „Maximal“) beziehungsweise um 30 t (+28 %) auf 138 t (Szenario „Real“) im Jahr 2040 erhöhen.

Hochgerechnet auf die gesamte Ackerfläche Österreichs von 1.322.912 ha ergeben sich 143 Mt Humus (ha x 108 t Humus/ha) als Ausgangsbasis. Der Humusanteil würde sich demnach bis 2040 um 111 % auf 302 Mt (Szenario „Maximal“) beziehungsweise um 28 % auf 183 Mt (Szenario „Real“) erhöhen.

Eine breite Umsetzung von humusmehrenden Maßnahmen in der Landwirtschaft wird aufgrund der Dringlichkeit verstärkt monetäre Anreize, die den Humusaufbau wirtschaftlich noch attraktiver machen, benötigen.

#### 5.4. Potenzial im Verhältnis zum maximalen CO<sub>2</sub>-Ausstoß laut Klimaschutzzielpfad

Zur Darstellung des Potenzials des Humusaufbaus als CO<sub>2</sub>-Senke werden in der untenstehenden Grafik die durchschnittlichen maximalen CO<sub>2</sub>-Emissionen zum Klimaschutzzielpfad des Wegener Centers bis 2040, in Abbildung 11 unter Kapitel 5.1 als rote Linie eingezeichnet, der CO<sub>2</sub>-Speicherung durch Humusaufbau laut Szenarien „Maximal“



beziehungsweise „Real“ gegenübergestellt. Die erste Grafik stellt hier ein durchschnittliches Jahr des Zeitraums 2021 bis 2040 dar.

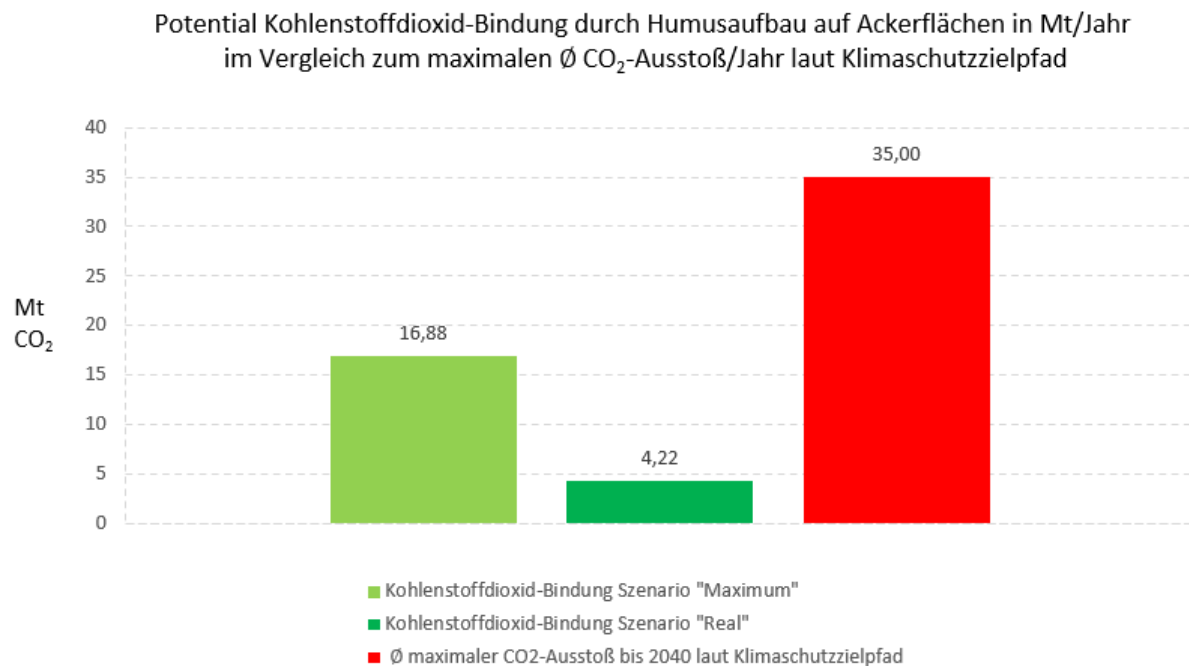


Abbildung 14: Potenzial CO<sub>2</sub>-Bindung durch Humusaufbau vs. Klimaschutzzielpfad

Im Betrachtungszeitraum dürfen durchschnittlich 35,5 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr emittiert werden. Humusaufbau könnte im Szenario „Maximal“ rund 17 Mt CO<sub>2</sub>, im Szenario „Real“ gut 4 Mt CO<sub>2</sub> pro Jahr binden. Zu erwähnen ist, dass hier, wie unter Punkt 4.2 dargestellt, nur Ackerflächen berücksichtigt werden. Andere Humusaufbaupotenziale wie unproduktive Flächen, Wald, Dauergrünland oder Dauerkulturen bleiben unberücksichtigt.

Vergleicht man die kumulierten CO<sub>2</sub>-Bindungspotenziale im Ackerboden bis 2040 im Kontext mit den maximal 700 Mt CO<sub>2</sub> laut Klimaschutzzielpfad ergibt sich untenstehendes Bild:

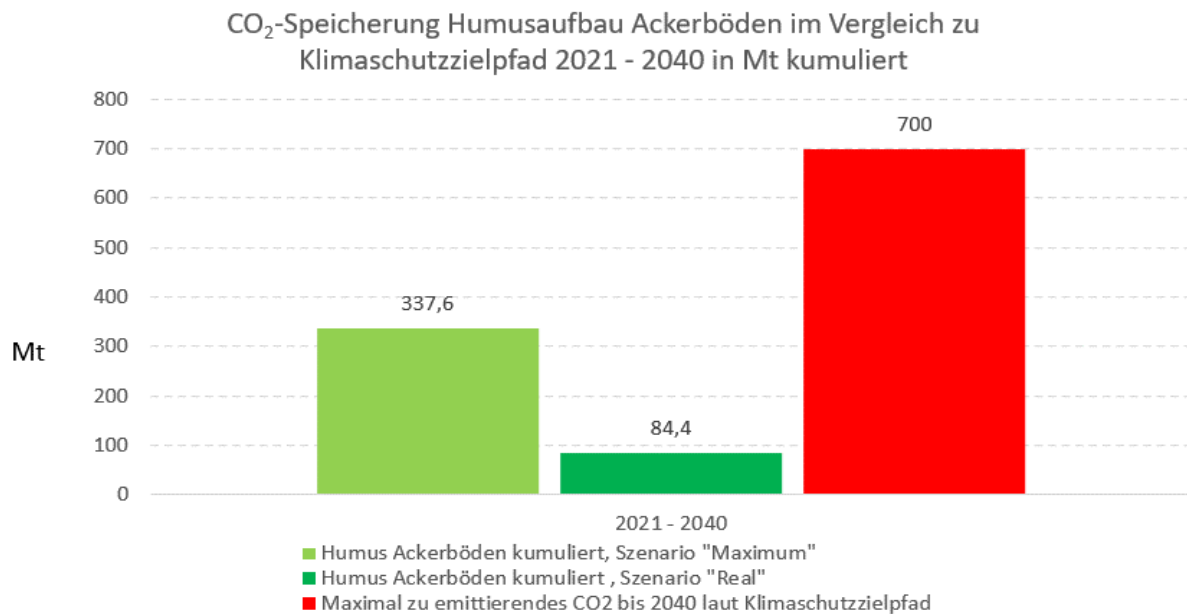


Abbildung 15: Potenzial CO<sub>2</sub>-Speicherung durch Humusaufbau vs. Klimaschutzzielpfad kumuliert

Klar ersichtlich ist der substantielle Beitrag, den Humusaufbau als CO<sub>2</sub>-Senke leisten kann, wenn es in Bezug zum maximal erlaubten CO<sub>2</sub>-Ausstoß gesetzt wird, um den Klimaschutzzielpfad bis 2040 zu erreichen.

### 5.5. Versuch einer Einordnung als Lösungsansatz für die Klimakrise

Höherer Humusanteil im Boden führt langfristig unter anderem zu qualitativ hochwertigeren Lebensmitteln, verbesserter Wurzelbildung, höherer Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens, und Widerstandsfähigkeit gegen Trockenperioden. Gefördert wird damit die Resilienz der landwirtschaftlichen Flächen, die gerade im Zeichen der anstehenden klimatischen Veränderungen besondere Bedeutung gewinnt.

Die hier beschriebenen Potenziale des Humusaufbaus sind hoch relevant, wenn diese in Relation mit dem maximal zu emittierenden CO<sub>2</sub> laut Wegener Center gesetzt werden. In den nächsten 20 Jahren dürfen maximal noch 700 Mt CO<sub>2</sub> emittiert werden. Im Vergleich dazu könnten die heimischen Ackerböden im Szenario „Maximum“ 337 Mt beziehungsweise im Szenario „Real“ 84 Mt CO<sub>2</sub> binden.

Eine monetäre Bonifizierung, gekoppelt mit sozialer Anerkennung und Wertschätzung, ist ein probates Mittel, um Landwirtinnen und Landwirte für Initiativen wie Humus+ für den Humusaufbau zu gewinnen. Aktuell nehmen vor allem Enthusiastinnen und Enthusiasten sowie Vorreiterinnen und Vorreiter bei Initiativen wie Humus+ teil. Um eine breite Masse für den Humusaufbau zu begeistern, wäre es zielführend, diese positiven Anreize gezielt und mit viel Engagement zu verstärken und auszubauen.

## 6. Fazit

Der Beitrag, den Humusaufbau bei der Speicherung von Kohlenstoff im Boden aus der Atmosphäre ermöglicht, ist nicht zu unterschätzen. Darüber hinaus geht aus der Arbeit hervor, dass durch eine Erhöhung des Humusanteils nachhaltige Landwirtschaft betrieben werden kann, um auch zukünftig klimafit zu sein. Die Einhaltung und Anwendung von Fruchtfolge, Mischkulturen, Untersaaten, Gründüngung, Winterbegrünung, Agroforstsystemen, Minimalbodenbearbeitung und Kompost als Dünger tragen fundamental zu Humusaufbau und demnach einer höheren Speicherkapazität an Kohlenstoff bei.

Die Beantwortung der Frage nach dem Beitrag, den der Humusaufbau zur Dekarbonisierung leisten kann, ist anhand dieser Arbeit möglich. Im Szenario „Maximal“, dieses entspricht 6 t Humusaufbau pro Hektar und Jahr, könnte auf allen österreichischen Ackerflächen annähernd die Hälfte des laut Klimaschutzzielpfads noch erlaubten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes kompensiert werden. Absolut sind das 16,88 Mt Kohlenstoffdioxid pro Jahr. Bis zum Jahr 2040 spiegelt das eine Summe von 337,6 Mt CO<sub>2</sub> wider. Im Szenario „Real“, dieses entspricht 1,5 t Humusaufbau pro Hektar und Jahr, könnte auf allen österreichischen Ackerflächen rund 12 % des laut Klimaschutzzielpfads noch erlaubten CO<sub>2</sub>-Ausstoßes kompensiert werden. In absoluten Zahlen sind das 4,22 Mt Kohlenstoffdioxid pro Jahr. Bis 2040 spiegelt das eine Summe von 84,4 Mt CO<sub>2</sub> wider.

Im Zuge dieser Arbeit sind Kontakte zu einigen Experten entstanden. Mit ihrem Wissen und ihrer Kompetenz ist es möglich gewesen, aktuelle Daten für die Berechnungen zu erlangen. An dieser Stelle bedanke ich mich insbesondere bei Dr. Stefan J. Forstner für sein Engagement und dem Zurverfügungstellen von zahlreichen Quellen.

Es ist festzuhalten, dass eine ausreichende Bonifizierung der humusaufbauenden Landwirtinnen und Landwirte unabdingbar ist, um einen Anreiz zur Umstellung oder Anpassung der Landwirtschaft auf ein bodenschonendes, humusförderndes Konzept zu erzielen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass das Bonifizierungsmodell den Humusaufbau und nicht ausschließlich einen hohen Kohlenstoffgehalt im Boden entlohnt. Kohlenstoff kann auch kurzfristig, etwa mittels Einarbeitung von Holz oder anderen organischen Pflanzenbestandteile, im Boden angereichert werden. Auf diese Weise wird jedoch nicht unbedingt Humus mit all seinen Mikroorganismen aufgebaut und Kohlenstoff kann nicht langfristig im Boden sequestriert werden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass eine

Diversität an Mikroben im Boden notwendig für die nachhaltige Speicherung von Kohlenstoff bis in tiefe Erdschichten ist. Ein weiterführendes Ziel könnte die kritische Hinterfragung beziehungsweise Verifizierung der hier getroffenen Annahmen sein. Weiters könnten zusätzliche Potenziale für die Kohlenstoffbindung im Boden sowohl in Österreich als auch international ermittelt werden.

## 7. Literaturverzeichnis

- AGES. (kein Datum). *Unersetzliche Ressource Boden*. Abgerufen am 1. November 2022 von <https://www.ages.at/umwelt/boden/informationen-zu-boden#c5928>
- AGES. (kein Datum). *Verschiedene Düngemittel im Blick*. Abgerufen am 24. Oktober 2022 von [https://www.ages.at/pflanze/duengemittel/duengemittel-informationen?sword\\_list%5B0%5D=minerald%C3%BCnger&no\\_cache=1#c4374](https://www.ages.at/pflanze/duengemittel/duengemittel-informationen?sword_list%5B0%5D=minerald%C3%BCnger&no_cache=1#c4374)
- Baumgarten, A., Dersch, G., Hösch, J., Spiegel, H., Freudenschuss, A., & Strauss, P. (2012). Bodenschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft. (HBLFA Raumberg-Gumpenstein, Hrsg.) Raumberg-Gumpenstein, Österreich. Abgerufen am 1. November 2022 von [https://raumberg-gumpenstein.at/component/rsfiles/download.html?path=Tagungen%2FUmweltoekologisches\\_Symposium%2FUmweltoekologisches\\_Symposium\\_2012%2Fu\\_2012\\_baumgarten.pdf](https://raumberg-gumpenstein.at/component/rsfiles/download.html?path=Tagungen%2FUmweltoekologisches_Symposium%2FUmweltoekologisches_Symposium_2012%2Fu_2012_baumgarten.pdf)
- Baumgarten, A., Haslmayr, H.-P., Schwarz, M., Huber, S., Weiss, P., Obersteiner, E., . . . Jandl, R. (15. November 2021). Organic soil carbon in Austria – Status quo and foreseeable trends. *Geoderma*. Abgerufen am 13. November 2022 von <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016706121002949>
- Berner, A., Frei, R., & Mäder, P. (Januar 2005). Entwicklung von pfluglosen Anbauverfahren im ökologischen Landbau unter Anwendung verschiedener Hofdüngerformen und biologisch-dynamischer Präparate. Abgerufen am 24. Oktober 2022 von <https://orgprints.org/id/eprint/3569/1/3569.pdf>
- BML. (kein Datum). *Humus im Bio-Landbau*. Abgerufen am 31. Oktober 2022 von <https://info.bml.gv.at/themen/landwirtschaft/bio-lw/bedeutung/biohumus.html>
- BML. (kein Datum). *Nitrat im Grundwasser bzw. Trinkwasser*. Abgerufen am 23. Oktober 2022 von [https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasserqualitaet/grundwasser/nitrat\\_grundwasser.html](https://info.bml.gv.at/themen/wasser/wasserqualitaet/grundwasser/nitrat_grundwasser.html)
- Boden.Leben. (kein Datum). *Boden.Leben*. Abgerufen am 31. Oktober 2022 von <https://www.bodenistleben.at/verein/>
- Chaboussou, F. (1996). *Pflanzengesundheit und ihre Beeinträchtigung. Kranke Pflanzen durch Agrarchemie* (2. Ausg.). Heidelberg: Stiftung Ökologie & Landbau und C.F. Müller Verlag.
- Danner, M. (10. Juli 2019). *Gülle Und Jauche Auf Bioflächen*. (BIO AUSTRIA, Herausgeber) Abgerufen am 24. Oktober 2022 von <https://biola.at/guelle-und-jauche-auf-bioflaechen/>
- Dunst, G. (2011). *Humusaufbau. Chance für Landwirtschaft und Klima* (1. Ausg.). Kaindorf: Verein Ökoregion Kaindorf.
- Dunst, G. (2015). *Kompostierung und Erdenherstellung. Praxisbuch und Anleitung für: Hausgarten, Landwirtschaft, Kommune und Profi* (1. Ausg.). Riedlingsdorf: Sonnenerde.
- EcoMind, Thomas Elssenwenger. (19. Februar 2016). *Kohlenstoff-Speicherung*. Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.ecomind.at/de/dekarbonisierung/kohlenstoff-speicherung/>
- FAO and ITPS. (15. September 2021). Recarbonizing global soils – A technical manual of recommended management practices. *Volume 2 - Hot spots and bright spots of soil organic carbon*. (FAO, Hrsg.) Rom. Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.fao.org/3/cb6378en/cb6378en.pdf>
- Forstner, S. J. (27. Oktober 2022). Persönliche Mitteilung. Wien: BFW Wien.
- Hahn, A. (5. Dezember 2022). Persönliche Mitteilung, Österreich: HUMUS+.
- Haslmayr, H.-P., Schwarz, M., Spiegel, H., Stüger, H.-P., Schwarz, M., Jandl, R., . . . Maier, P. (23. August 2022). *ASOCseq – Austrian Soil Organic. Endbericht des Forschungsprojektes Nr. 101636*. (BML, & DaFNE, Hrsg.) Wien. Abgerufen am 1. November 2022 von [www.dafne.at](http://www.dafne.at): [https://dafne.at/content/report\\_release/ac2c73ab-c767-4ad1-8679-aa101b81762f\\_0.pdf](https://dafne.at/content/report_release/ac2c73ab-c767-4ad1-8679-aa101b81762f_0.pdf)
- Hennig, E. (2011). *Geheimnisse der fruchtbaren Böden. Die Humuswirtschaft als Bewahrerin unserer natürlichen Lebensgrundlagen* (5. Ausg.). (K. W. Lau, Hrsg.) Kevelaer: OLV.

- Hirtenfellner, J. (12. Oktober 2020). *Klimaneutral*. (Universität Graz, Herausgeber) Abgerufen am 25. Dezember 2022 von <https://wegcenter.uni-graz.at/de/neuigkeiten/detail/article/der-weg-zur-klimaneutralitaet/>
- HUMUS Bewegung. (kein Datum). *HUMUS Bewegung*. (Verein "Faire Biogetreide-Vermarktung", Herausgeber) Abgerufen am 31. Oktober 2022 von <https://humusbewegung.at/>
- IPCC Sixth Assessment Report. (4. April 2022). *IPCC*. Abgerufen am 24. August 2022 von [https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_SummaryForPolicymakers.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6wg3/pdf/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf)
- Maurin, J. (4. Januar 2009). *Mehr Ertrag mit weniger Pflug*. Abgerufen am 24. August 2022 von <https://taz.de/Forscher-testen-neuen-Oekolandbau/!5170216&s=jost+maurin+Mehr+Ertrag/>
- Poepflau, C., Don, A., Vesterdal, L., Leifeld, J., Bas, v., Schumacher, J., & Gensior, A. (1. Februar 2011). Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone – carbon response functions as a model approach. *Global Change Biology, Issue 7*. Abgerufen am 2. November 2022 von <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x>
- Rusch, H. P. (2014). *Bodenfruchtbarkeit. Eine Studie biologischen Denkens* (8. Ausg.). (K. W. Lau, Hrsg.) Kevelaer: OLV.
- Sanderman, J., Hengl, T., & Fiske, G. J. (5. September 2017). Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. (National Academy of Sciences, Hrsg.) *PNAS, No. 36*. Abgerufen am 1. November 2022 von <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1706103114>
- Scheub, U., & Schwarzer, S. (2017). *Die Humusrevolution. Wie wir den Boden heilen, das Klima retten und die Ernährungswende schaffen* (3. Ausg.). München: oekom.
- Scheub, U., Pieplow, H., & Schmidt, H.-P. (2015). *Terra Preta. Die schwarze Revolution aus dem Regenwald* (5. Ausg.). München: oekom.
- Statistik Austria (Hrsg.). (12. Juli 2022). *Bodennutzung der land- und forstwirtschaftlichen Betriebe 1995, 1999, 2010, 2020*. Abgerufen am 2. November 2022 von <https://statistik.at/statistiken/land-und-forstwirtschaft/betriebsstruktur/bodennutzung>
- Umweltbundesamt. (30. April 2015). Austrian Carbon Calculator - ACC. (Umweltbundesamt, Hrsg.) Abgerufen am 2. November 2022 von [https://www.ccca.ac.at/fileadmin/00\\_DokumenteHauptmenue/03\\_Aktivitaeten/Klimatag/Klimatag2015/Vortrag%20Sedy.pdf](https://www.ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/03_Aktivitaeten/Klimatag/Klimatag2015/Vortrag%20Sedy.pdf)
- Verein Humus+. (kein Datum). *CO2-Bindung*. Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.humusplus.at/humus-wissen/co2-bindung-durch-humusaufbau>
- Verein Humus+. (kein Datum). *Die drei Prinzipien*. Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.humusplus.at/humus-wissen/die-drei-prinzipien#c1012>
- Verein Humus+. (kein Datum). *Die HUMUS+Tage 2022 am 30. und 31. Mai in Kaindorf!* Abgerufen am 31. Oktober 2022 von <https://www.humusplus.at/detailseiten/news/humusaufbau-dummy-news-1>
- Verein Humus+. (kein Datum). *HUMUS+LandwirtIn werden*. Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.humusplus.at/humus-landwirtinnen/humus-landwirtin-werden>
- Verein Humus+. (kein Datum). *Unsere Humus+ZertifikatekäuferInnen*. Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.humusplus.at/das-projekt/sponsoren-1>
- Verein Humus+. (kein Datum). *Vorteile von Humusaufbau*. Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.humusplus.at/humus-wissen/vorteile-von-humusaufbau>
- Verein Humus+. (kein Datum). *Was ist Humus?* Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.humusplus.at/humus-wissen/was-ist-humus>
- Verein Humus+. (kein Datum). *Wir regenerieren Böden und Klima!* Abgerufen am 24. August 2022 von <https://www.humusplus.at/das-projekt/ueber-uns>

## 8. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Landwirtschaftliche Bewirtschaftung kann zu Humusauf- oder -abbau führen (Dunst, 2011, S. 14).....	8
Abbildung 2: Kohlenstoffanteil in Österreichs Böden, 0 bis 30 cm Tiefe (Baumgarten, et al., 2021, S. 4) .....	12
Abbildung 3: Kohlenstoffvorräte in Österreichs Böden im Jahr 2020 (Haslmayr, et al., 2022, S. 36)....	13
Abbildung 4: Kohlenstoff-Verluste in t C/ha in den vergangenen 200 Jahren in Europa (Sanderman, Hengl, & Fiske, 2017, S. 9577).....	14
Abbildung 5: Kohlenstoff-Verluste in t/ha, wobei positive Abweichungen Kohlenstoff-Verluste entsprechen (Sanderman, Hengl, & Fiske, 2017, S. 9577) .....	15
Abbildung 6: Geschätzter Einfluss verschiedener treibhausgasreduzierender Ansätze (IPCC Sixth Assessment Report, 2022, S. SPM-50) .....	26
Abbildung 7: Bodennutzung Österreichs in ha (Statistik Austria, 2022).....	27
Abbildung 8: Karte mit der Differenz der Kohlenstoffvorräte zwischen dem "BAU"-Szenario im Jahr 2040 und des Ausgangsvorrats 2020 in t C/ha (Haslmayr, et al., 2022, S. 42).....	29
Abbildung 9: Unterschied der Kohlenstoffvorräte vom Ausgangswert in 2020 in t C/ha und dem mittels "High C-Input" Szenario vorhergesagten Wertes für 2040 (Haslmayr, et al., 2022, S. 57) .....	29
Abbildung 10: Vergleich der vier Szenarien in t C/ha anhand des Beispiels Marchfeld (Haslmayr, et al., 2022, S. 60).....	30
Abbildung 11: Klimaschutzzielpfad für Österreich zur Klimaneutralität bis 2040 (Hirtenfellner, 2020) .....	33
Abbildung 12: Ansatz zur Ermittlung des Humus- beziehungsweise CO <sub>2</sub> -Gesamtpotenzials .....	35
Abbildung 13: Potenzial Humusentwicklung auf heimischen Ackerböden .....	36
Abbildung 14: Potenzial CO <sub>2</sub> -Bindung durch Humusaufbau vs. Klimaschutzzielpfad.....	37
Abbildung 15: Potenzial CO <sub>2</sub> -Speicherung durch Humusaufbau vs. Klimaschutzzielpfad kumuliert....	38

## 9. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Kohlenstoffgehalte in Österreichs Böden in tC/ha (vgl. Forstner, 2022) .....	11
Tabelle 2: Berechnung der CO <sub>2</sub> -Bindung des Projekts Humus+ (Verein Humus+, kein Datum).....	32



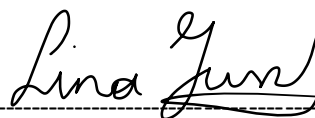
**Name:** Lina Juszt

**Selbstständigkeitserklärung**

Ich erkläre, dass ich diese vorwissenschaftliche Arbeit eigenständig angefertigt und nur die im Literaturverzeichnis angeführten Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Groß-Enzersdorf, 02.02.2023

-----  
Ort, Datum

Handwritten signature of Lina Juszt in black ink, written over a dashed horizontal line.

-----  
Unterschrift der Schülerin