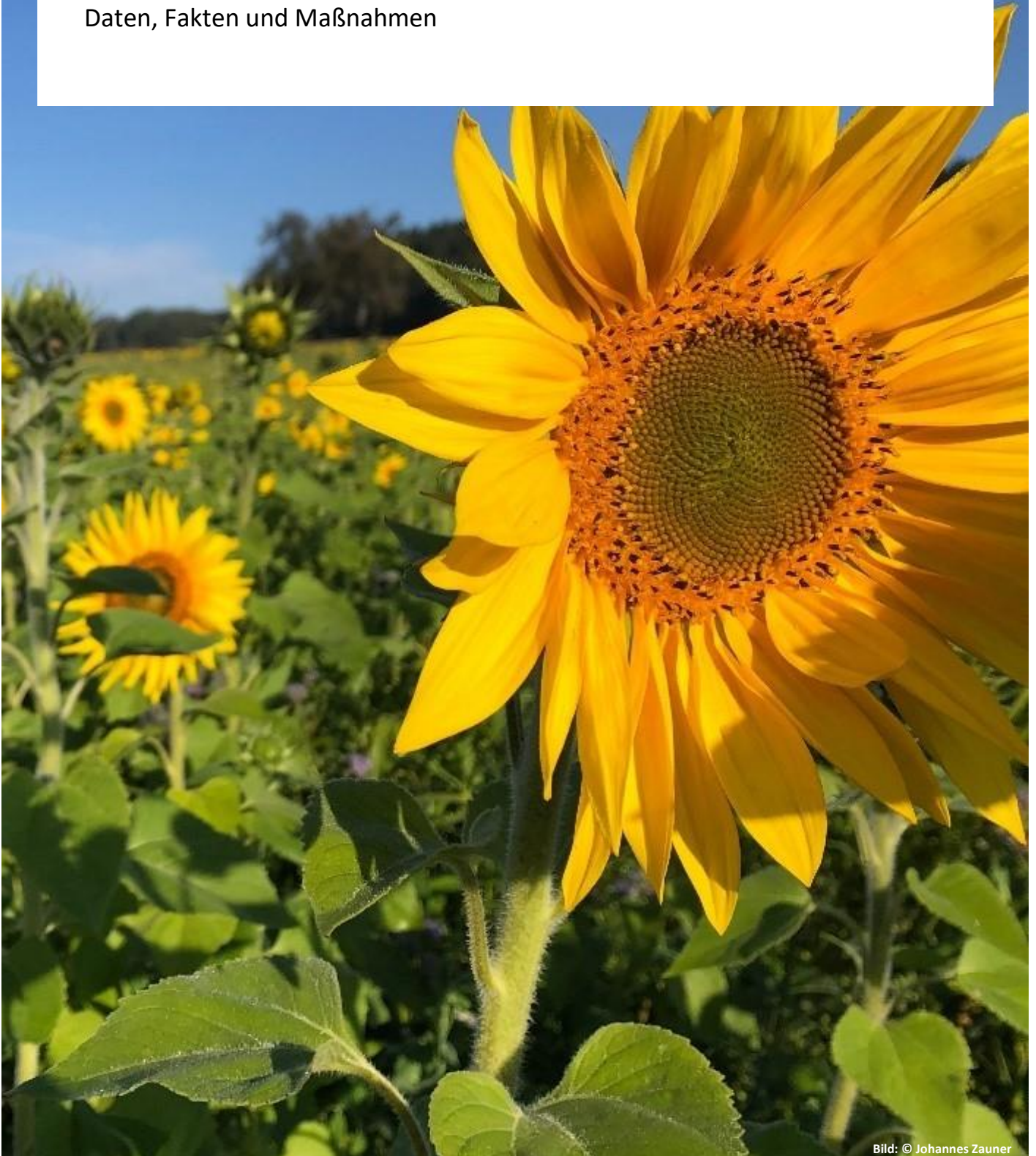


# Humus in Diskussion

Daten, Fakten und Maßnahmen



## **Impressum**

Medieninhaber und Herausgeber:

Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft

Stubenring 1, 1010 Wien

Leitung und Redaktion: Andreas Baumgarten, Andrea Spanischberger, Nora Mitterböck

Hauptautoren (in alphabetischer Reihenfolge): Gernot Bodner, Andreas Bohner, Georg Dersch, Gerald Dunst, Reinhard Egger, Eva Erhart, Stefan Forstner, Wolfgang Friesl-Hanl, Lukas Gaier, Martin H. Gerzabek, Hans Gerhard Gnauer, Gabriele Gollner, Elfi Hasler, Franz Hölzl, Heinrich Holzner, Katharina Keiblinger, Johannes Maszwohl, Horst Müller, Willi Peszt, Claudia Preinstorfer, Ferdinand Regner, Elmar Schmaltz, Katrin Sedy, Ena Smidt, Gerhard Soja, Heide Spiegel, Johannes Tintner, Franz Traudtner, Peter Weiss, Claudia Winkovitsch, Marie-Luise Wohlmuth, Heinz-Peter Zach, Johannes Zauner

unter der Mitarbeit von: Ernst Bäck, Winfried Blum, Franz Breitwieser, Christoph Czerwenka, , Olivier Duboc, Harald Fagner, Jürgen K. Friedel, Sarah Gallob, Alfred Grand, Christian Härtel, Sigbert Huber, Monika Humer, Georg Juritsch, Hans-Peter Kaul, Andreas Klingler, Martin Leist, Klemens Mechtler, Christian Meusburger, Claudia Mittermayr, Christian Partl, Christine Petritz, Dieter Petutschnig, Andreas Pfaller, Holger Pirchegger, Philipp Prock, Wolf Reheis, Paul Riedmann, Erich Roscher, Christoph Scheffknecht, Christian Schilling, Elisabeth Schwaiger, Bettina Schwarzl, Hubert Seiringer, Josef Springer, Christian Steiner, Peter Strauss, Andreas Surböck, Alexandra Tiefenbacher, Josef Wasner, Walter Wenzel, Sophie Zechmeister-Boltenstern

Grafikdesign: Leonie Fink

Fotonachweise: Johannes Zauner (S. 1 und S. 43), Lorenz Mayr (S. 44), Claudia Winkovitsch (S. 45) und Thomas Rupp (S. 60)

Wien, 2022.

### **Copyright und Haftung:**

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet, alle sonstigen Rechte sind ohne schriftliche Zustimmung des Medieninhabers unzulässig.

Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist.

Rechtausführungen stellen die unverbindliche Meinung der Autorin/des Autors dar und können der Rechtsprechung der unabhängigen Gerichte keinesfalls vorgreifen.

Rückmeldungen: Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an [andrea.spanischberger@bml.gv.at](mailto:andrea.spanischberger@bml.gv.at).

## Vorwort



Mag. Norbert Totschnig, MSc

Humusgehalt in Böden ist wichtiges Zukunftsthema

Gesunde Böden sind die Grundlage für lebenswerte Regionen. Sie schützen vor Hochwasser und Hitzeinseln, speichern CO<sub>2</sub>, versorgen uns mit regionalen Lebensmitteln und prägen unser einzigartiges Landschaftsbild. Aktuell steht das Thema Humus als wichtiger Teil des Bodens immer stärker im Fokus der Öffentlichkeit und auch der europäischen Politik.

Seit Beginn der 1990er Jahre gibt es eine positive Entwicklung der Humus-Gehalte heimischer Ackerböden. Dieser Erfolg ist vorwiegend auf Maßnahmen im Österreichischen Programm für umweltgerechte Landwirtschaft (ÖPUL) zurückzuführen. Dazu gehören etwa effiziente Fruchtfolgen, eine reduzierte Bodenbearbeitung, die biologische Bewirtschaftung sowie zahlreiche Bildungs- und Beratungsmaßnahmen.

Für die heimische Landwirtschaft sind Fruchtbarkeit und Gesundheit der Böden entscheidend. Durch einen optimalen Humusgehalt im Boden können diese wichtigen Faktoren verbessert werden. Der Fachbeirat für Bodenfruchtbarkeit und Bodenschutz hat sich zum Ziel gesetzt, das Thema Humus möglichst praxisgerecht aufzubereiten. In einer Kooperation von Bund, Ländern, Forschungseinrichtungen, Unternehmen sowie Praktikerinnen und Praktikern aus der Landwirtschaft wurde die nun vorliegende Broschüre erstellt. Darin werden aktuelles Wissen und praxiserprobte Maßnahmen für humuserhaltende oder humusaufbauende Wirtschaftsweisen - sowohl für biologische als auch konventionell wirtschaftende Betriebe - vorgestellt. Enthalten sind auch Daten zum Humus-Gehalt der österreichischen Böden, Berichte von Best-Practice-Beispielen sowie Initiativen auf EU- und nationaler Ebene.

Der Schutz heimischer Böden und die Erhaltung der Humusschicht sind wichtige Zukunftsthemen – sowohl im Zusammenhang mit der Ernährungssicherheit, als im Kampf gegen den Klimawandel. Österreich ist im Bereich Humus bereits gut unterwegs. Mit dieser neuen Informationsbroschüre können wir diese positive Entwicklung weiter vorantreiben. Ich werde mich auch in Zukunft dafür einsetzen, dass Österreich hier eine Vorreiterrolle einnimmt.

Norbert Totschnig  
Bundesminister

## Inhalt

|                                                                                                                             |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Vorwort .....</b>                                                                                                        | <b>3</b>  |
| <b>1 Einleitung .....</b>                                                                                                   | <b>6</b>  |
| 1.1 Allgemeines.....                                                                                                        | 6         |
| 1.2 Humus: Definition und Entstehung .....                                                                                  | 7         |
| 1.3 Einfluss des Humus auf Bodeneigenschaften.....                                                                          | 11        |
| 1.4 Einfluss von Umweltbedingungen und Bewirtschaftung auf den Humus.....                                                   | 12        |
| 1.4.1 Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf den Humus .....                                                                  | 12        |
| 1.4.2 Einfluss des Klimawandels auf den Humus.....                                                                          | 13        |
| 1.4.3 Einfluss der Bodenerosion auf den Humus.....                                                                          | 14        |
| 1.4.4 Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Humus.....                                                                      | 20        |
| 1.5 Daten zum organischen Kohlenstoff in Österreich.....                                                                    | 20        |
| <b>2 Maßnahmen zur Humusanreicherung und Humuserhaltung.....</b>                                                            | <b>24</b> |
| 2.1 Allgemein .....                                                                                                         | 24        |
| 2.2 Maßnahmen auf Ackerflächen zum Humusaufbau bzw. zur Humuserhaltung .....                                                | 25        |
| 2.2.1 Optimierung der Fruchtfolge .....                                                                                     | 25        |
| 2.2.2 Organische Düngung.....                                                                                               | 26        |
| 2.2.3 Bedarfsgerechte mineralische Düngung - Stickstoff .....                                                               | 29        |
| 2.2.4 Belassen bzw. Einarbeitung von Ernteresten .....                                                                      | 29        |
| 2.2.5 Zwischenfrüchte/Gründüngung.....                                                                                      | 30        |
| 2.2.6 Ausgeglichener Wasserhaushalt.....                                                                                    | 31        |
| 2.2.7 Bewässerung.....                                                                                                      | 32        |
| 2.2.8 Agroforstsysteme.....                                                                                                 | 32        |
| 2.2.9 Direktsaat.....                                                                                                       | 33        |
| 2.2.10 Reduzierte Bodenbearbeitung.....                                                                                     | 33        |
| 2.2.11 Biologische Landwirtschaft als Maßnahmenbündel.....                                                                  | 33        |
| 2.2.12 Einsatz von Biokohle .....                                                                                           | 34        |
| 2.2.13 Schlussfolgerungen zu den Ackerbaumaßnahmen .....                                                                    | 36        |
| 2.3 Maßnahmen auf Dauergrünland zum Humusaufbau bzw. zur Humuserhaltung .....                                               | 37        |
| 2.3.1 Erhalt von Dauergrünland mit humuserhaltender bzw. –fördernder<br>Grünlandbewirtschaftung .....                       | 39        |
| 2.3.2 Erhalt oder Wiederherstellung von Mooren .....                                                                        | 41        |
| <b>3 Möglichkeiten zur Überprüfung der Wirksamkeit von Maßnahmen/Monitoring (auf<br/>Betriebsebene oder national) .....</b> | <b>42</b> |
| 3.1. Bodenuntersuchungen .....                                                                                              | 42        |
| 3.2. Bilanzierungen .....                                                                                                   | 47        |

|                                                                                                                                 |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.3. Monitoring auf EU-Ebene.....                                                                                               | 54         |
| <b>4 Handlungsoptionen für die Umsetzung von humussteigernden – bzw. erhaltenden Maßnahmen in die Praxis.....</b>               | <b>55</b>  |
| 4.1 Förderung durch die öffentliche Hand .....                                                                                  | 55         |
| 4.1.1 Flächenbezogene Förderung .....                                                                                           | 55         |
| 4.1.2 Beispiele für aktuelle Projekte .....                                                                                     | 60         |
| 4.2 Privatinitiativen.....                                                                                                      | 68         |
| 4.2.1 Beispiele für Vereinsinitiativen.....                                                                                     | 68         |
| 4.2.2 Marketingprogramme (Handel/Produktion) .....                                                                              | 69         |
| 4.2.3 Zertifizierungssysteme.....                                                                                               | 69         |
| 4.3 Aktuelle Entwicklungen auf EU-Ebene .....                                                                                   | 78         |
| <b>5 Good Practice Beispiele für klimaangepasste und humusaufbauende/humuserhaltende Landwirtschaft auf Betriebsebene .....</b> | <b>87</b>  |
| <b>6 Resümee .....</b>                                                                                                          | <b>100</b> |
| <b>7 Anhang (Daten/Hintergrundinformationen).....</b>                                                                           | <b>102</b> |
| 7.1 Ausführliche Erläuterung zu den Humuspools .....                                                                            | 102        |
| 7.2 Biokohle .....                                                                                                              | 104        |
| 7.2.1 Biokohle und organischer Kohlenstoff im Boden .....                                                                       | 104        |
| 7.2.2 Biokohle als spezielle Form der organischen Masse im Boden.....                                                           | 105        |
| 7.2.3 Biokohle zur langfristigen Kohlenstoff-Bindung im Boden.....                                                              | 108        |
| <b>Tabellenverzeichnis.....</b>                                                                                                 | <b>111</b> |
| <b>Abbildungsverzeichnis.....</b>                                                                                               | <b>112</b> |
| <b>Literaturverzeichnis .....</b>                                                                                               | <b>114</b> |
| <b>8 Bodenkundliches Glossar .....</b>                                                                                          | <b>131</b> |
| <b>Abkürzungen.....</b>                                                                                                         | <b>136</b> |

# 1 Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Unsere Böden haben vielfältige Aufgaben und Funktionen. Dazu zählen unter anderem die Produktions-, die Filter-, die Puffer- und Speicherfunktion, aber auch die Lebensraum-, Archiv- und Kulturfunktion. Die Produktionsfunktion für Energie-, Futter- und Lebensmittel kann kurzfristig, die Speicherfunktion auch mittel- und längerfristig Kohlenstoff festlegen und damit den Klimawandel bremsen. Beide Funktionen gleichzeitig zu erfüllen, ist eine Herausforderung. Erschwerend wirken sich auch die zukünftig zu erwartende Verknappung fossiler Brennstoffe und die dadurch erforderliche Bereitstellung erneuerbarer Energien aus. Dies führt zu einer weiteren Verstärkung der Flächenkonkurrenz.

Humusaufbau kann nur funktionieren, wenn die Biologie des Bodens, das heißt Pflanzen mit Ernterückständen und Wurzeln, Bodentiere und Mikroorganismen, ins Zentrum gestellt wird. Das erfordert bei Vielen ein Umdenken. Nichtsdestoweniger führt kein Weg daran vorbei, um die Landwirtschaft im Spannungsfeld Lebensmittelproduktion-Bodengesundheit-Klimawandel voran zu bringen.

Böden, die das Potenzial haben, Wasser rasch aufzunehmen und länger zu speichern, ein aktives Bodenleben und keine bis geringe Verdichtungen aufweisen, porös sind und eine gute Nährstoffverfügbarkeit haben, werden mit den Auswirkungen des Klimawandels besser zurechtkommen. Solche Böden weisen langfristig eine höhere Bodenfruchtbarkeit auf und erfüllen ihre Produktionsfunktion stabiler. Der globale Klimawandel führt durch die höheren Temperaturen und längeren Vegetationsperioden zu einer steigenden Verdunstung und somit zu einer geringeren Bodenfeuchte. Eine dauerhafte Bodenbedeckung ist wichtig, um einen Boden „klimafit“ zu machen. Die Gesamtheit aller abgestorbenen organischen Stoffe aus pflanzlicher, tierischer und mikrobieller Herkunft wird als Humus bezeichnet. Dieser beeinflusst viele wichtige Bodeneigenschaften und -funktionen. Humus stellt eine langsam fließende Nährstoffquelle für Pflanzen, Bodenmikroorganismen und Bodentiere dar. Er wirkt gefügeschaffend und –stabilisierend, indem sich die Mineralteilchen mit der organischen Substanz zu Ton-Humuskomplexen verbinden. Dadurch entsteht ein hohlraumreicher Bodenverband, der das Porensystem und den Luft- und Wasserhaushalt des Bodens verbessert. Bodenverdichtungen und Erosion können durch optimale Humusgehalte vermindert werden. Humus kann Wasser speichern, eine Eigenschaft, die auch im Hinblick auf die



Klimaerwärmung von Bedeutung ist. Humus stellt eine bedeutende Kohlenstoffsенке dar und spielt somit eine wichtige Rolle für den Klimaschutz.

Ein angepasstes Bodenmanagement ist eine Möglichkeit, sowohl die Nährstofffreisetzung als auch die Kohlenstofferhaltung bzw. -speicherung zu gewährleisten und gleichzeitig einen energiesparenden und ressourcenschonenden Anbau zu betreiben.

## 1.2 Humus: Definition und Entstehung

Als Humus werden allgemein jene 30-50 Masseprozent der organischen Bodensubstanz definiert, die nach Abzug der lebenden Organismen (< 5 %) sowie frischer (< 10 %) und noch nicht abgebauter Pflanzenreste (30-55 %) übrigbleiben.

Ursprünglich wurde davon ausgegangen, dass die Grundlage von Humus stabile organische Makromoleküle, die sogenannten Huminstoffe, seien, die aus abgebauten organischen Materialien im Boden neu aufgebaut werden.

Dabei leisten schwer zersetzbare Stoffe (wie z. B. Lignin-reiche Ernterückstände) und großmolekulare Huminstoffe (z. B. Humine, Huminsäuren) einen wichtigen Beitrag zum sogenannten Dauerhumus. Leicht abbaubare Materialien (z. B. Kohlenhydrate und Eiweiße) und niedermolekulare Huminstoffe (z. B. Fulvosäuren) werden als Nährhumus bezeichnet, da sie wieder rasch durch Mikroorganismen abgebaut werden können.

Neueste Untersuchungen haben aber gezeigt, dass chemisch sehr unterschiedliche Substanzen ähnlich lang in den Böden verweilen (Schmidt et al., 2011) und dies nicht nur von der biochemischen Abbaubarkeit abhängig ist.

Kleinere organische Moleküle können sich zu relativ stabilen supramolekularen Strukturen in der Bodenlösung zusammenschließen (Petrov et al., 2017). Diese Strukturen zerfallen zu kleineren Substrukturen und Molekülen, wenn sie in Kontakt mit reaktiven Oberflächen (z. B. Tonmineralen) kommen (Galicia-Andres et al., 2021). Sie zeigen die Eigenschaften, wie sie für Huminstoffe seit Jahrzehnten berichtet wurden, allerdings nicht als Makromoleküle, sondern eben als supramolekulare Strukturen beziehungsweise als kleine Moleküle, die an reaktiven mineralischen Bodenoberflächen adsorbiert sind (Gerzabek et al., 2022). Diese Autoren schlagen als neue Definition von Huminstoffen vor, diese als Formen der organi-

schen Bodensubstanz zu bezeichnen, die sich als supramolekulare Strukturen in der Bodenlösung befinden oder nach Reaktion mit mineralischen Bodenoberflächen dort adsorbiert sind. Sie sind für die Adsorption von Nähr- und Schadstoffen von besonderer Bedeutung (Petrov et al., 2020).

Daher sind die Entstehung und Stabilität von Humus als Ökosystemeigenschaft zu sehen (Schmidt et al., 2011, Lehmann und Kleber 2015, Lehmann et al. 2020). Der Humus ist dann stabil, wenn der Abbau der organischen Produkte bis zum CO<sub>2</sub> durch Boden- und Umwelteigenschaften unterbrochen oder verlangsamt wird (Dungait et al. 2012, Abbildung 1). So können sich die organischen Stoffe durch Wechselwirkung mit mineralischen Bodeneigenschaften in stabilen Pools anreichern.

Abbildung 1: Humus als Ökosystemeigenschaft (Dungait et al. 2012)

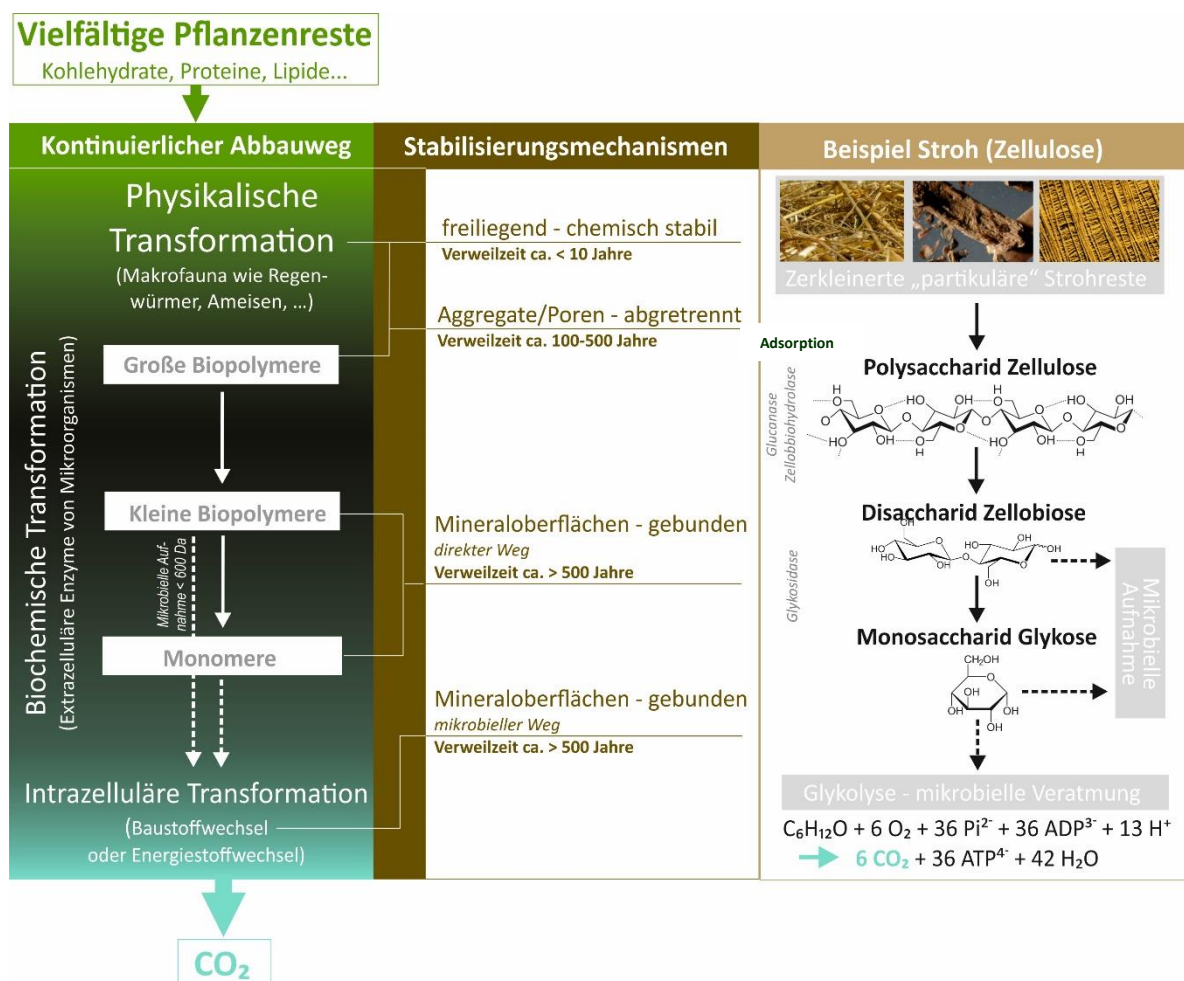


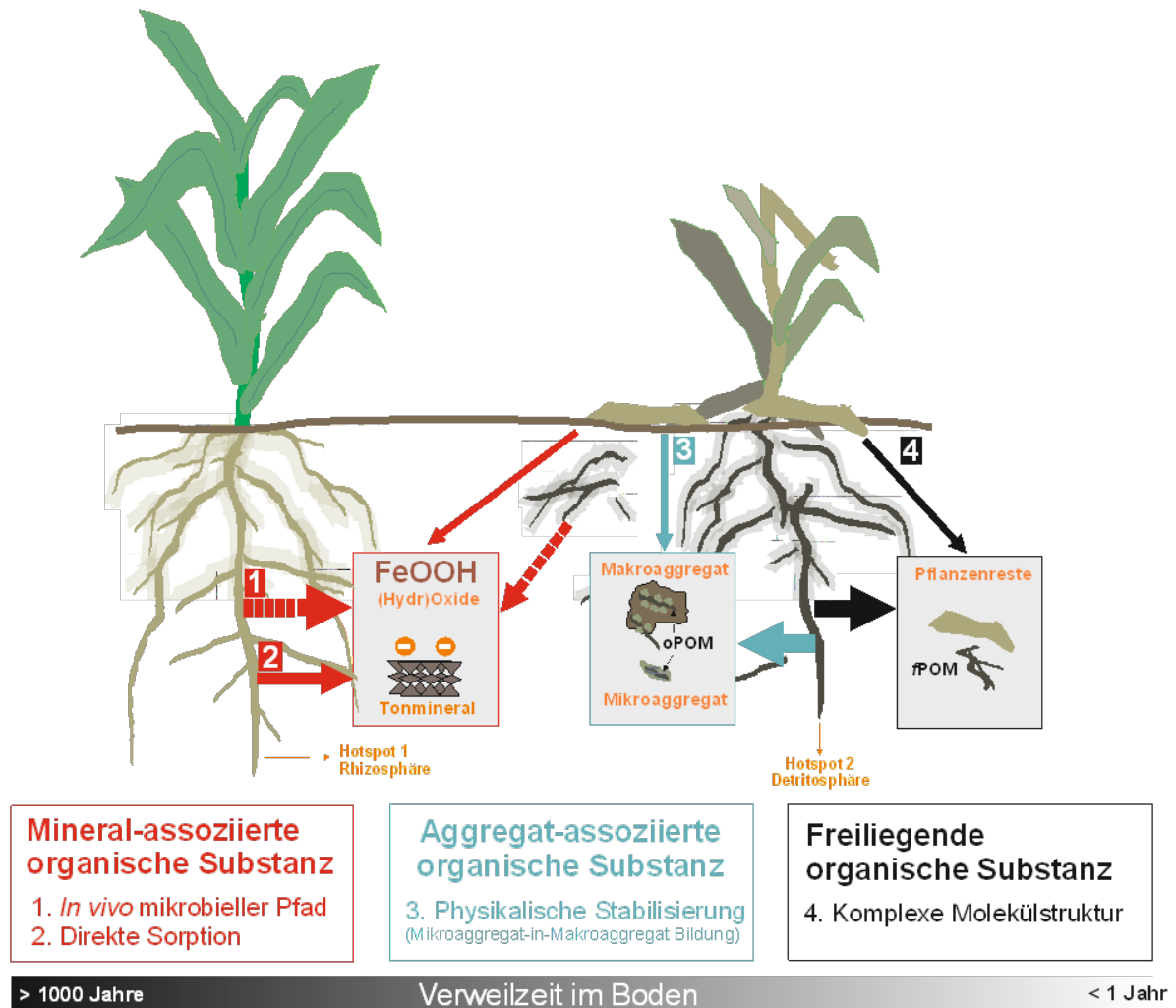
Abbildung 1 zeigt, wie der Abbau bzw. die Stabilisierung von Pflanzenresten erfolgen kann. Auf dem Abbauweg können die organischen Reststoffe in Aggregaten (betrifft vor allem



Wurzelrückstände) und an geladenen Oberflächen (vor allem Ausscheidungsprodukte von Mikroorganismen und Wurzeln) stabilisiert werden. Auch die Lebensbedingungen und die Zusammensetzung der Mikroorganismengemeinschaft beeinflussen die Abbaudynamik und damit die Humusgehalte. Die Stabilisierung der organischen Bodensubstanz findet hauptsächlich in den Bodenaggregaten (Aggregat-Pool) sowie durch Anlagerung an Mineraloberflächen (Tonminerale, Oxide und Hydroxide; Schluff/Ton-gebundener Pool) statt. Freiliegende partikuläre organische Substanzen (POM), selbst wenn diese aus für Bodenmikroorganismen nur schwer abbaubaren Molekülen bestehen, haben dagegen wesentlich geringere Verweilzeiten. Auch die Umweltbedingungen der Mikroorganismen beeinflussen die Abbaudynamik: Kälte (z. B. in Gebirgsböden) oder Sauerstoffarmut (z. B. in Anmoorböden) verlangsamen den Abbau vieler, potentiell abbaubarer Pflanzenrückstände sehr stark und führen zu hohen Gehalten an organischer Bodensubstanz.

Abbildung 2 zeigt das Zusammenspiel von Boden-Mineralpartikeln, Mikroorganismen sowie Pflanzenwurzeln zum Aufbau stabiler mineral- und aggregat-gebundener organischer Substanz (Sokol et al., 2019; Sokol und Bradford, 2019). Weitere Details dazu finden sich im Anhang.

Abbildung 2: Humuspools, deren Bildungspfade und Stabilisierungsmechanismen (Ungefähre Angabe der mittleren Verweilzeiten der Pools in der Abbildung und im nachfolgenden Text nach Von Lützow et al., 2007)



## Pflanzenvielfalt und Bodenmikrobiologie als Schlüssel im Humusmanagement

Bodenmikroorganismen spielen eine zentrale Rolle beim Humusaufbau. Ein wichtiges Konzept zur Beschreibung des mikrobiellen Humusaufbaus ist die sogenannte mikrobielle Kohlenstoff-Pumpe. Mikroorganismen können den Humus teilweise als Nahrungsquelle nutzen und ihn zu CO<sub>2</sub> veratmen. Gleichzeitig bauen diese Mikroorganismen durch ihr Wachstum mikrobielle Biomasse auf. Diese neu gebildete Biomasse kann nach dem Absterben potentiell als Humus stabilisiert werden (v.a. im Mineral-assozierten und im Aggregat-assozierten Humuspool, Liang et al., 2017). Das Verhältnis aus Humusabbau und Humusaufbau durch Mikroorganismen bestimmt also den Netto-Beitrag der mikrobiellen Kohlenstoff-Pumpe zum Humusaufbau.

Die mikrobielle Aktivität und Kohlenstoffspeicherung im Boden wird weiters entscheidend durch Kohlenstoffeinträge aus Wurzeln beeinflusst. Diese sind wiederum von der Vielfalt der vorkommenden Pflanzen abhängig (Lange et al., 2015). Die Autoren zeigten, dass der Humusaufbau weniger über den Abbau von toter organischer Substanz, sondern vielmehr über die Funktion der mikrobiellen Gemeinschaften und direkte Fixierung von Kohlenstoff abläuft.

Strategien für den Humusaufbau im Boden müssen daher auf Grundlage dieser Stabilisierungsmechanismen und Speicherpools organischer Bodensubstanz konzipiert werden. Untersuchungsverfahren, die die Wirksamkeit der Strategien überprüfen, werden derzeit erarbeitet (siehe Anhang).

### 1.3 Einfluss des Humus auf Bodeneigenschaften

Humusanreicherung hat neben der Speicherung von Kohlenstoff viele zusätzliche Vorteile („Co-Benefits“), die hinlänglich bekannt sind. In der Praxis sind besonders folgende für Landwirt:innen relevant:

- die Verbesserung der Infiltrations- und Wasserhalteeigenschaften von Oberböden,
- die Erhöhung der Erosionsstabilität durch Strukturverbesserungen sowie
- langfristig eine mögliche Reduktion der Nährstoffzufuhr.

Im Folgenden ist die Wirkung von Humus auf physikalische, chemische und biologische Parameter im Detail zusammengefasst:

#### **Physikalische Parameter:**

- Erhöhung der Bodentemperatur durch die dunkle Farbe,
- Verbesserung der Bodenstruktur und Aggregatsstabilität durch Ton-Humus-Komplexe,
- Verringerung der Lagerungsdichte durch eine bessere Bodenstruktur d. h. stabilere Aggregate und in Folge eine bessere Durchwurzelung,
- Erhöhung der Infiltration und Wasserhaltekapazität durch ein höheres Porenvolumen,
- Verbesserung der Durchlüftung durch ein höheres Porenvolumen,
- Verbesserung der Durchwurzelung durch eine bessere Bodenstruktur und
- Erhöhung der Filterkapazität, da die organische Substanz in den Bodenporen Stoffe aus dem Bodenwasser filtert.

### **Chemische Parameter:**

- Verbesserung der Nährstoffspeicherung und Pufferfunktion durch eine Erhöhung der Austauschplätze für Kationen an seiner Oberfläche,
- Lieferung von Nährstoffen, die im organischen Material enthalten sind,
- Mobilisierung von Nährstoffen durch Säurebildung und mikrobielle Aktivität speziell im Wurzelraum und
- Immobilisierung von toxischen Substanzen.

### **Biologische Parameter:**

- Lebensraum und Nahrungsgrundlage für die Bodenlebewesen und
- Förderung von Wirkstoffen wie Vitaminen und Wuchsstoffen.

## **1.4 Einfluss von Umweltbedingungen und Bewirtschaftung auf den Humus**

### **1.4.1 Einfluss der Wasserverfügbarkeit auf den Humus**

Humusaufbau und eine standorttypisch gute Ausstattung mit Humus sind aufgrund der aktuellen Klimaveränderungen sehr wichtig für die Aufrechterhaltung der Bodenfruchtbarkeit. Wetterextreme wie Dürre und Starkregen fordern die Böden stark. Um die Resilienz der Böden gegenüber diesen beiden Extremen zu stärken, ist es sinnvoll, die Wasserspeicherfähigkeit und die Infiltrationsleistung der Böden zu erhöhen. Humusaufbauende Maßnahmen wirken sich positiv auf den Wasserhaushalt der Böden und die Infiltrationsleistung aus.

Humusgehalt, Wasserspeicherfähigkeit und damit die Wasserversorgung des Bodens sind eng verknüpft. Dies ist auch bei der Bewässerung zu beachten. Grundsätzlich hilft eine Bewässerung, die Produktivität aufrecht zu erhalten und damit den Standort durch das geförderte Pflanzenwachstum mit organischer Substanz anzureichern. Bewässerung fördert die Durchwurzelung des Bodens und die Produktion. Erfolgt durch Bewässerung jedoch eine Produktionsverschiebung hin zu intensiven Kulturen (z. B. Gemüsebau), ist allerdings ein verstärkter Humusabbau möglich, da diese Kulturen stark humuszehrend wirken können.

Durch eine Bewässerung werden die humusabbauenden Prozesse gefördert, andererseits verbessert sich aber auch das Pflanzenwachstum. Bei Böden mit hohen Umsatzraten (z. B. stark sandige Böden) wird der Humusabbau durch Bewässerung besonder beschleunigt. Diese Böden sind jedoch von Natur aus meist „mager“ und weisen nur geringe Humusgehalte auf. Werden diese leichten Böden bewässert, muss sehr auf eine ausreichende Kohlenstoffzufuhr geachtet werden, genauso wie beim Anbau von humuszehrenden Kulturen in Verbindung mit Bewässerung. Um die Fruchtbarkeit des Standorts aufrecht zu erhalten, ist jedenfalls besonders auf eine ausreichende Versorgung der Böden mit organischem Material zu achten, um die Humusversorgung und damit die Wasserspeicherfähigkeit der Böden aufrecht zu erhalten oder zu verbessern.

### **1.4.2 Einfluss des Klimawandels auf den Humus**

Im Rahmen des vom KLIEN-Fonds geförderten Projekts Austrian Carbon Calculator (ACC) wurde der Einfluss von ackerbaulichen Maßnahmen auf die Boden-C-Dynamik sichtbar gemacht.

Die Wirkung der Maßnahmen, die Bodenkohlenstoff auf- oder abbauen, wurde mit prognostizierten Klimaänderungen kombiniert, um die Auswirkungen der zukünftigen Bewirtschaftung sichtbar zu machen.

Die unterschiedlichen ackerbaulichen Maßnahmen, die in der Modellierung bewertet wurden, waren Fruchtfolge, Düngung, Bodenbearbeitung und Begrünung in Bezug auf die lokale Bodenart und die herrschenden Klimaverhältnisse. Die Entwicklung der organischen Bodensubstanz, in Form von Zu- oder Abnahmen, wurde dargestellt und gezielte Anpassungsmaßnahmen konnten im Rahmen des Modells theoretisch getestet werden.

Folgende Kernaussagen können aufgrund der Arbeiten gemacht werden:

Vor allem durch höhere Temperaturen und gleichbleibende Niederschlagsverhältnisse erhöht sich im Allgemeinen der Bodenkohlenstoffumsatz, wodurch ein höherer Anteil des Kohlenstoffvorrats umgesetzt bzw. mineralisiert wird. Um das aktuelle Bodenkohlenstoffgehaltsniveau aufrecht zu erhalten bzw. zu verbessern, muss daher mehr organische Substanz zugeführt werden (Ernterückstände, Begrünungen, Feldfutter), bzw. die Mineralisierungsfördernde Prozesse (Bodenbearbeitung) verringert werden. Diese humusaufbauenden Prozesse müssen für eine Stabilisierung der Boden-C-Verhältnisse langfristig beibehalten

werden. In den Ergebnissen hat sich gezeigt, dass insbesondere das Erhöhen des organischen Inputs (Ernterückstände, Begrünungen), sowie die Reduktion der Bodenbearbeitung zu einer deutlich verbesserten Humusversorgung führen.

Auch die Fruchtfolge spielt eine Rolle, so wirkt sich z. B. der Anbau von Ackerfutter (Klee-gras) positiv auf die Humusversorgung aus. Die Ergebnisse des Projektes ACC belegen, dass die gängigen Anpassungsmaßnahmen wirksam sind.

Aufgrund des Klimawandels wird sich unter der Annahme von steigenden Temperaturen und gleichbleibenden Niederschlägen in gewissen Gebieten in Österreich die biologisch aktive Zeit im Jahr und damit die Jahresmineralisierungsrate erhöhen. Dies führt bei gleicher Bewirtschaftung unweigerlich zu einem Humusrückgang auf ein niedrigeres Niveau. Nur bei verstärkter Umsetzung von humusfördernden Maßnahmen kann das aktuelle Niveau gehalten werden. Bei sinkenden Niederschlägen kann dieser Trend gegenläufig sein (siehe Projekt Austrian Carbon Calculator <https://www.bwsb.at/?+Austrian+Carbon+Calculator++ACC++Projekt+&id=2500%2C%2C2365468%2C>)

### **1.4.3 Einfluss der Bodenerosion auf den Humus**

Neben klimatischen Veränderungen und Bodenverdichtung hat auch der Verlust von Bodenmaterial durch Erosionsprozesse einen starken Einfluss auf den Humusgehalt des Oberbodens. Im Allgemeinen bewirken Niederschlagsereignisse mit hohen Erosionsraten einen Verlust an fruchtbarem Oberboden und dem darin gebundenen Humus (Klik und Rosner, 2020; Strauss und Klaghofer, 2001). Organische Substanzen hingegen verbessern die Aggregatstabilität des Oberbodens, binden Bodenpartikel und sind dadurch resistenter gegenüber erosiven Niederschlägen (Strauss, 2001).

Je nach Bodenart, Hanglage, Klima und Fruchtfolge sind die Böden mehr oder weniger vom Bodenabtrag durch Wasser- oder Winderosion betroffen. Der Klimawandel trägt zunehmend zu Starkregenereignissen von April bis September bei. Von Austrocknung betroffene Böden können bei plötzlich auftretendem Starkregen die Wassermengen nicht mehr adäquat aufnehmen und speichern; es kommt zu Bodenverkrustungen, Abschwemmung und somit zu Humusverlust besonders in Hanglagen.



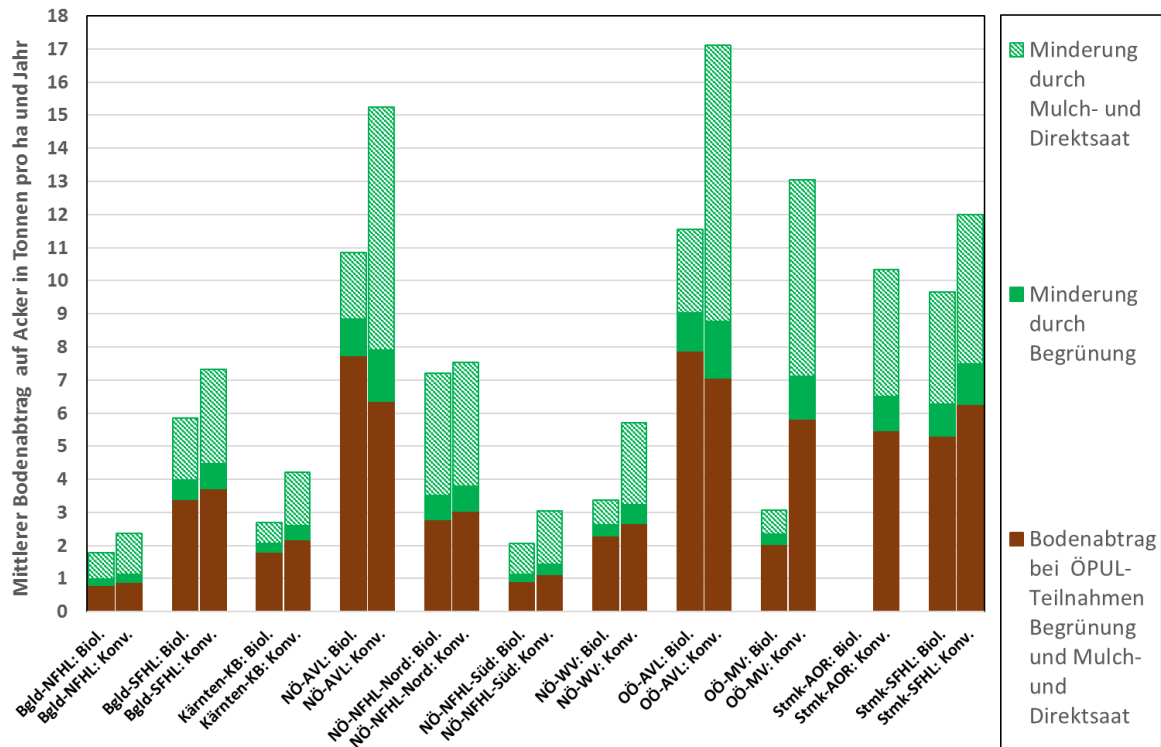
Die ÖPUL 2015-Maßnahme „Mulch- und Direktsaat“ schützt den Boden vor Verdunstung (Evaporation) sowie vor Bodenabtrag durch Erosion. Versuche der Universität für Bodenkultur ergaben, dass durch kontinuierliche Bodenabdeckung in Verbindung mit einer Minimalbodenbearbeitung das Wasserhaltevermögen der Böden und somit auch die Mobilisierung von Nährstoffen für die Pflanzen verbessert wird (Bodner, 2007).

Baumgarten et al. (2011) haben auf den positiven Effekt von aktiven Bodenschutzmaßnahmen, wie sie beispielsweise im ÖPUL definiert und umgesetzt sind, auf den Humusgehalt des Oberbodens hingewiesen. Die Studie von Strauss et al. (2020) hat darüber hinaus das große Reduktionspotenzial einzelner ÖPUL-Maßnahmen auf Bodenverlust durch Erosionsprozesse hervorgehoben. Obwohl die Erosionsschutzmaßnahmen, die im ÖPUL definiert sind, maßgeblich zu einer Verringerung des potentiellen Bodenabtrags und damit gleichzeitig zur Erhaltung des humusreichen Oberbodens beitragen, werden diese Maßnahmen flächenmäßig nur unzureichend und zum Teil ineffektiv in Anspruch genommen.

Durch die Novellierung des ÖPUL mit der Berücksichtigung weiterer Erosionsschutzmaßnahmen kann allerdings der Trend mit positiven Effekten auf den Bodenschutz sowie eine Verringerung von Bodenverlusten und Humusverlagerung im Ackerland weiter fortgesetzt werden.

In Abbildung 3 wird die Wirkung von Begrünungen, die über den Winter verbleiben, mit und ohne anschließende Mulch- und Direktsaat bei erosionsgefährdeten Kulturen wie Mais, Soja, Zuckerrübe, Ölkürbis und Erdäpfeln veranschaulicht. Auf diesen Ackerflächen, auf denen die ÖPUL-Maßnahmen umgesetzt wurden, zeigt sich eine wesentliche Verminderung der potentiellen Bodenerosion. In braun dargestellt ist der modellierte mittlere Bodenabtrag in Tonnen pro ha und Jahr bei Anwendung der ÖPUL-Maßnahmen. Ohne Umsetzung der genannten Erosionsschutzmaßnahmen steigt der Bodenabtrag deutlich, insbesondere auf stark geneigten Flächen und somit auch in Regionen mit einem hohen Anteil an Hanglagen. Dies trifft insbesondere auf das Alpenvorland (AVL), das südöstliche Flach- und Hügelland (SFHL) und das Mühlviertel (W/MV) zu. Die Bodenerosion bei Mulch- und Direktsaat (grün schraffiert) ist deutlich geringer als bei Begrünung allein, weil somit in der Periode mit erosiven Niederschlägen eine ausreichende Bodenbedeckung mit erhöhter Versickerungsleistung vorhanden ist. Intensive Bodenbearbeitung zum Umbruch der Winterbegrünung vor dem Anbau der genannten Kulturen vermindert das Risiko von Bodenabtrag nur wenig im Vergleich zur Schwarzbrache über den Winter. Zukünftig ist es wichtig, insbesondere auf Maßnahmen in den gefährdeten Lagen zu achten, um auf regionaler Ebene den Bodenabtrag deutlich zu vermindern.

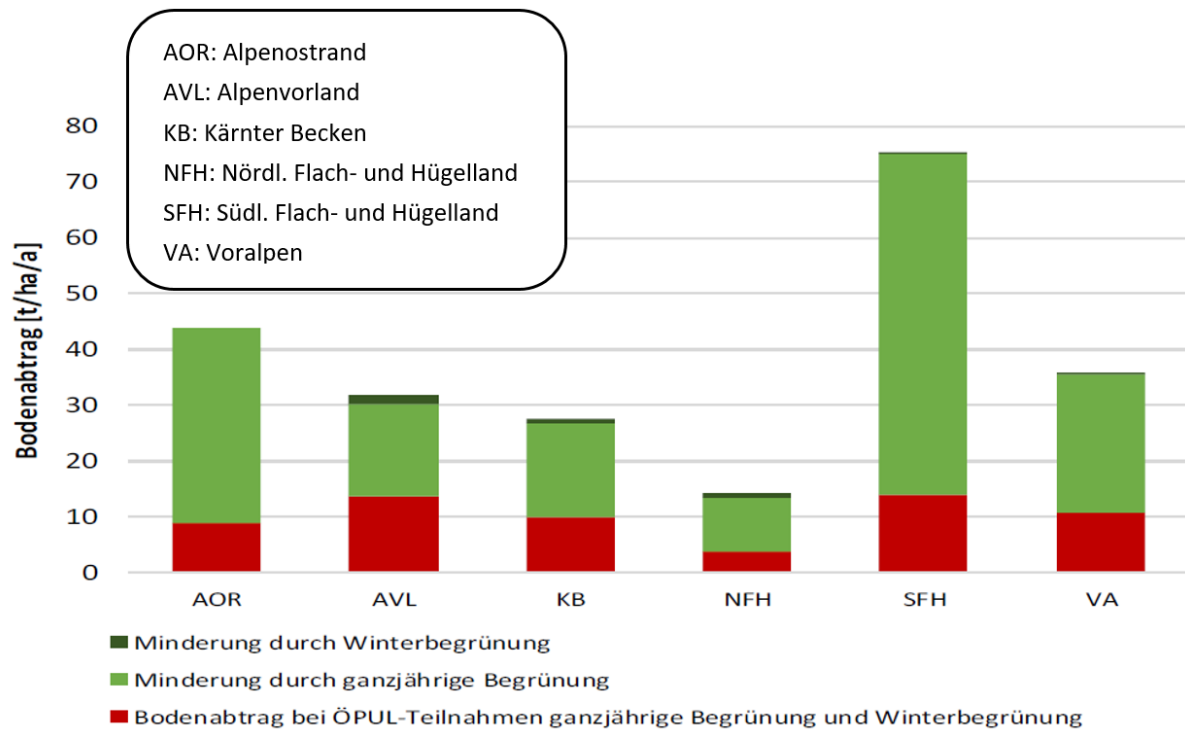
Abbildung 3: Wirkung von Begrünung und nachfolgender Mulch- und Direktsaat bei erosionsgefährdeten Kulturen auf den Bodenabtrag pro ha im Jahr 2018 bei biologischer und konventioneller Wirtschaftsweise in den Bundesländern und Regionen (Strauss et. al 2020, Bodenerosion in Österreich – Eine nationale Berechnung mit regionalen Daten und lokaler Aussagekraft für ÖPUL)



Regionen: NFHL - Nordöstl. Flach- und Hügelland: Bgld., Nord-NÖ (Wachau, Westl. Weinviertel, Östl. Waldviertel, Laaer Bucht, Hollabrunn-Mistelbacher Gebiet, Östl. Weinviertel), NÖ-Süd (Herzogenburg-Tulln-Stockerauer Gebiet, Marchfeld, Wiener Becken, Baden-Gumpoldskirchen, Steinfeld); SFHL - Südöstl. Flach- und Hügelland; KB - Kärntner Becken; AVL - Alpenvorland; WV - Waldviertel; MV - Mühlviertel; AOR - Alpenostrand

Ein ähnliches Bild ergibt sich bei den Erosionsschutzmaßnahmen (Fahrgassenbegrünung) für Dauerkulturen wie Wein und Obst. Die grünen Balken zeigen den Beitrag der Fahrgassenbegrünung auf die Erosionsminderung, insbesondere in den Hanglagen des Wein- und Obstbaus. Eine besonders hohe Wirkung zeigt sich im südöstlichen Flach- und Hügelland (SFHL) der Steiermark, wo sowohl intensiver Wein-, als auch Obstbau aufgrund der Topographie auf stärker erosionsgefährdeten Flächen stattfindet, und eine hohe Teilnahmebereitschaft an den angebotenen Erosionsschutzmaßnahmen besteht.

Abbildung 4: Wirkung von Erosionsschutzmaßnahmen im Wein- und Obstbau – wesentlichen Einfluss hat nur die ganzjährige Begrünung (Strauss et. al 2020, Bodenerosion in Österreich – Eine nationale Berechnung mit regionalen Daten und lokaler Aussagekraft für ÖPUL)



Die regional angebotene Maßnahme „Vorbeugender Oberflächengewässerschutz“ im ÖPUL 2015 trägt außerdem ergänzend zur Verminderung des Bodenabtrags von Ackerböden und damit verbundenen diffusen Phosphat- und Pflanzenschutzmitteleinträgen in naheliegenden Gewässern bei. Dies geschieht insbesondere durch die Anlage von Gewässerrandstreifen (dauerhafte Begrünung).

## **Einfluss von Bodenverdichtung auf den Humus**

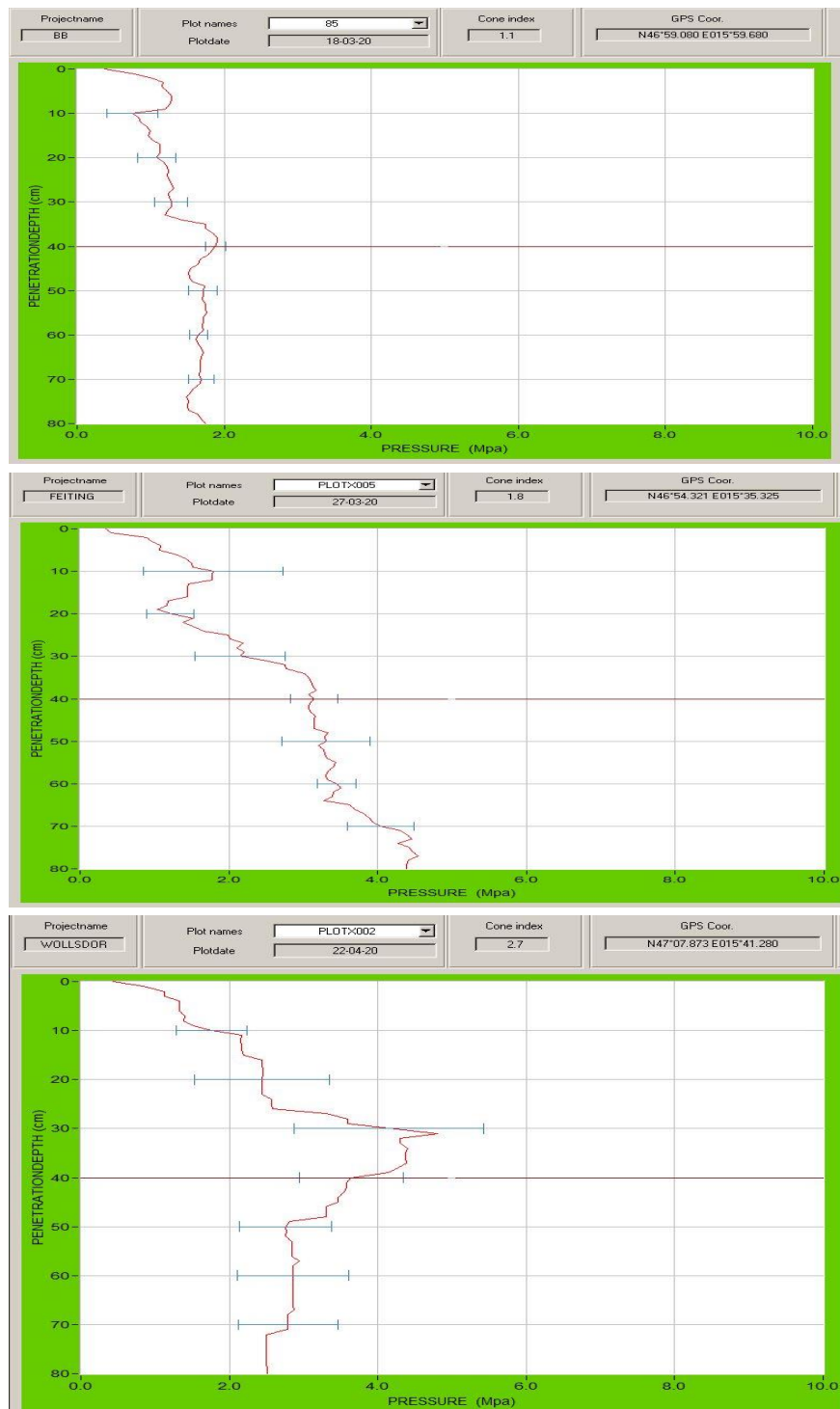
Bodenverdichtungen verschlechtern die physikalischen, biologischen und pflanzenbaulichen Eigenschaften eines Bodens und behindern somit auch wertvolle Bemühungen zum Humusaufbau. Zusätzlich fördern oberflächennahe Bodenverdichtungen auch die Erosion auf den Hangflächen, was zu beträchtlichen Humusverlusten führt.

Die Böden beispielsweise im Hauptackerbaugebiet der Steiermark reichen von sandig-schottrigen Standorten im Murtal von Graz bis Bad Radkersburg bis zu ton- und schluffreichen Böden in der West- und Südoststeiermark. Die Fruchtfolge der Betriebe ist hackfruchtbetont (Mais, Ölkürbis) und auf den ton- und schluffreichen Standorten finden sich vielerorts entsprechende Bodenverdichtungen.

Um diese Verdichtungen anschaulich darstellen und auch das Ausmaß dieser Bodenverdichtungen erfassen zu können, messen Mitarbeiter:innen des Kompetenzzentrums „MyHumus“ der steirischen Landwirtschaftskammer mittels Penetrometer diese Verdichtungen. Erste Erfahrungen mit einem digitalen Penetrometer („Penetrologger“ mit GPS-Funktion, Datenlogger und Bodenfeuchtemessung ausgestattet) zeigen einerseits klassische Verdichtungshorizonte durch den Einsatz des Pflugs, nach ersten Einschätzungen allerdings nicht in dem Ausmaß wie bisher angenommen. Andererseits sind aber auch Verdichtungen im Bereich der Bearbeitungsgrenze nach langjährigem Grubbereinsatz feststellbar.

Natürliche Mittel- und Unterbodenverdichtungen wie sie vor allem auf den zahlreichen Pseudogleyen (durch Stauwasser beeinflusste Böden) in diesem Gebiet vorkommen sind mittels digitalem Penetrometer ebenfalls sehr gut dargestellt.

Abbildung 5: Eindringwiderstand (Verdichtungen) mittels Penetrometer auf Versuchsflächen der LK Steiermark bis in eine Tiefe von 80 cm; Grafik oben: kaum Verdichtungen; Grafik mitte: starke Unterbodenverdichtung; Grafik unten: Pflugsohlenverdichtung; (Johannes Maßwohl, LK Steiermark)



#### 1.4.4 Einfluss der Bodenbearbeitung auf den Humus

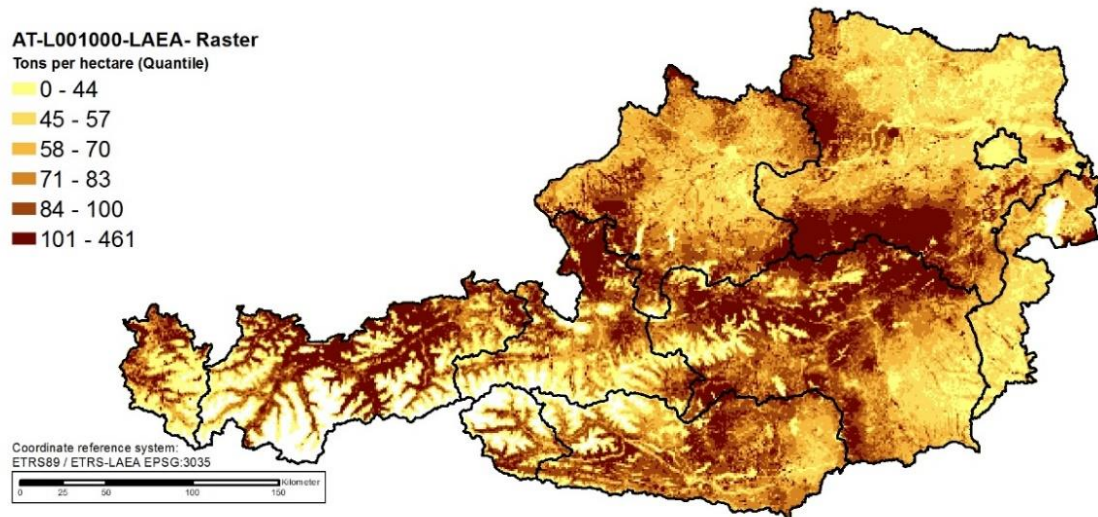
Bodenbearbeitung bedeutet Sauerstoff in den Boden zu bringen und das mikrobielle Bodenleben anzuregen, was zu einer Mineralisierung der organischen Substanz und CO<sub>2</sub> - Freisetzung führt. Je intensiver die Bodenbearbeitung durchgeführt wird, desto stärker kommt es zur Mineralisierung. Für die Produktionsfunktion ist dies wichtig, da Nährstoffe für das Wachstum der Pflanzen freigesetzt werden. Die Nährstofffreisetzung erfolgt allerdings auf Kosten des Humusgehaltes. Die Kohlenstoffspeicherfunktion des Bodens wird durch intensive Bodenbearbeitung daher herabgesetzt.

Die reduzierte/angepasste Bodenbearbeitung ist eine Möglichkeit, sowohl die Nährstofffreisetzung als auch die Kohlenstofferhaltung bzw. -speicherung zu gewährleisten und gleichzeitig einen energiesparenden und ressourcenschonenden Anbau zu betreiben. Zusätzlich wird durch die ausreichende Zufuhr organischer Substanz (Zwischenfruchtbegrünungen, Untersaaten) der Kohlenstoffkreislauf geschlossen und die Bodenfruchtbarkeit gesteigert.

### 1.5 Daten zum organischen Kohlenstoff in Österreich

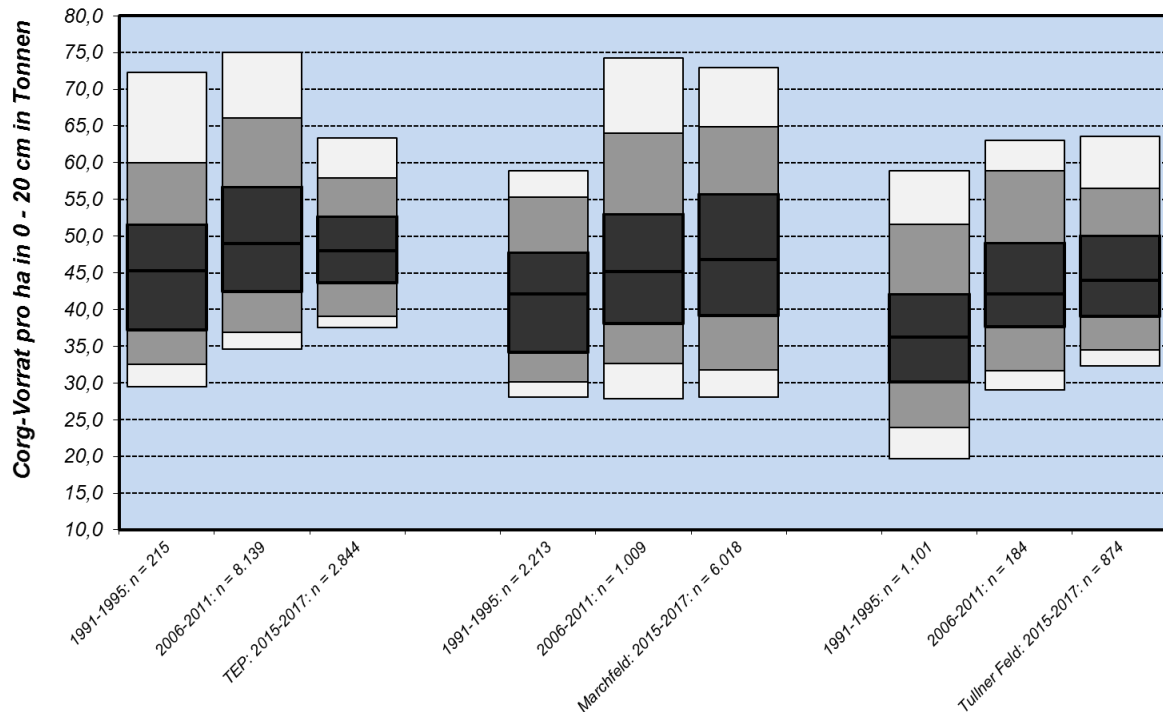
Die in Österreich verfügbaren Daten zum organischen Kohlenstoff (TOC bzw. C<sub>org</sub>) in den Böden wurden im Projekt (ASOC – Österreichische Karte des organischen Bodenkohlenstoffs, Endbericht zum DAFNE-Forschungsprojekt Nr. 101255, Baumgarten et al., 2018) zusammengeführt. Diese Daten stammen aus unterschiedlichen Erhebungszeiträumen. Bei 76 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche Österreichs wurden im Oberboden Gehalte an organischem Kohlenstoff über 1,5 Masse- % (entspricht ca. 2,5 % Humus) festgestellt. Bei 28 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche konnten über 3 % TOC (entspricht ca. 5 % Humus) festgestellt werden. Nur knapp 6 % der Fläche zeigen Gehalte unter 1 % TOC. Die restlichen Flächen liegen zwischen 1 und 1,5 % TOC. Gehalte von mehr als 20 Masse- % TOC (Moorböden) wurden bei 1 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche ermittelt.

Abbildung 6: Gesamtösterreichische Karte des organischen Kohlenstoffvorrates [t/ha] im Boden in 0-30 cm Tiefe umgelegt auf den 1 x 1 km ETRS-LAEA-Raster Asoc Projekt (Baumgarten et al., 2018)



In Abbildung 7 ist die zeitliche Entwicklung der Kohlenstoffvorräte in 3 wichtigen landwirtschaftlichen Produktionsgebieten dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Kohlenstoffvorräte zunehmen bzw. sich einem Optimalgehalt annähern (BMNT, 2019)

Abbildung 7: Verlauf des C<sub>org</sub> - Vorrates von Ackerböden (t/ha in den obersten 20 cm) für die 3 Regionen Traun-Enns-Platte (TEP), Marchfeld und Tullner Feld (Dersch, 2019)



Zur Kalkulation der C<sub>org</sub>-Vorräte (Pools) wurden folgende Annahmen getroffen:

Lagerungsdichte nach der Gleichung von Körschens & Waldschmidt (1995): Lagerungsdichte =  $1,5 \text{ g cm}^{-3} - (0,007 \text{ g cm}^{-3} \times C_{\text{org}} (\%) / 0,1)$ .

Beispiel: C<sub>org</sub>-Gehalt von 2,2 % (entspricht 3,79 % Humus);

Lagerungsdichte =  $1,5 - 0,007 \times 2,2 / 0,1 = 1,346 \text{ g cm}^{-3}$  auf.

Die Berechnungen auf Basis dieser Gleichung ergaben eine gute Übereinstimmung mit den ermittelten Lagerungsdichten ( $\pm 10 \%$ ) der OÖ. Bodenzustandsinventur 1993 und wurden daher für alle Ackerböden verwendet (Gebetsroither et al., 2001). Bei Böden ohne Grobanteil über 2 mm kann eine geringe Überschätzung des C<sub>org</sub>-Pools auftreten. Bei Böden mit hohem Grobanteil kann sich eine deutliche Überschätzung ergeben.

Für die Schicht von 0-20 cm ergibt sich ein C<sub>org</sub>-Pool von 59,2 t/ha, für 0-25 cm 75 t/ha.

### Humusgehalte in Oberösterreich



Die Humusgehalte der Regionen in Oberösterreich unterscheiden sich deutlich, mit dem niedrigsten Mittelwert im Alpenvorland von 3,3 % und dem höchsten Wert in den Voralpen mit 4,9 %. Dies ist auf die klimatischen Unterschiede (v.a. auf Grund der Höhenlage) und die unterschiedlichen Kulturarten zurückzuführen.

In den Hochlagen des Mühlviertels zeigt sich eine große Bandbreite der Gehalte. Dies ist auf die einerseits hohen Feldfutter- und Wechselwiesenanteile in den Hochlagen (Humusgehalte zwischen 5 und 7 %) und andererseits auf das langjährige Fehlen von Feldfutter in der Fruchtfolge (Humusgehalte zwischen 2 und 3 %) zurückzuführen. Auf den leichten Mühlviertler Granit-Verwitterungsböden ist offenbar ohne Feldfutter in der Fruchtfolge der Humusgehalt nur sehr schwer im anzustrebenden Bereich zu halten. Im Alpenvorland und in den Mittellagen des Mühlviertels sind die Verteilungen ähnlich. Bei biologisch bewirtschafteten Flächen ist durch den höheren Anteil an Feldfutterpflanzen und dem geringeren Maisanteil der Humusgehalt um 0,1 – 0,3 % höher als auf konventionellen.

Im Alpenvorland steigt der Humusgehalt auf Ackerland mit zunehmenden GVE - Bestand von 3,2 auf bis 3,4 %, im Mühlviertel von 3,3 auf bis zu 3,7 % an. Dabei sind die Effekte bei Rinderhaltung ausgeprägter als bei Schweinehaltung (Dersch et al., 2013)

### **Humusgehalte in der Steiermark**

Ergebnisse der Routinebodenuntersuchung zeigten, dass die Ackerböden der obersteirischen Bezirke durchschnittlich höhere Humusgehalte als jene der südlichen Bezirke aufweisen. Die Ursache dafür liegt in einer vielfältigeren Fruchtfolge in den obersteirischen Grünlandgebieten, die durch einen hohen Anteil von Wechselwiesen geprägt ist. Im zeitlichen Verlauf (10 bis 20 Jahre) gab es keine wesentlichen Änderungen.

Im Rahmen des steiermärkisch landwirtschaftlichen Bodenschutzprogramms wurde an 45 Standorten der zeitliche Verlauf innerhalb von zwei Untersuchungsdekaden überprüft. Insgesamt konnte eine Erhöhung des Humusgehaltes festgestellt werden. 2016 lagen unter Berücksichtigung der Bewertungsklassen der Richtlinie für die sachgerechte Düngung im Ackerbau und Grünland (SGD) alle Standorte im optimalen Bereich.

## 2 Maßnahmen zur Humusanreicherung und Humuserhaltung

### 2.1 Allgemein

Humus trägt wesentlich zur Bodenfruchtbarkeit und zur Erfüllung der Bodenfunktionen bei, sein Aufbau ist aber endlich und reversibel. Der Humusgehalt im Boden kann dauerhaft nur soweit gesteigert werden, bis ein neues, standortspezifisches Gleichgewicht erreicht ist. Die Maßnahmen der Bewirtschaftung, die zum Humusaufbau geführt haben, müssen nachfolgend aufrechterhalten werden, sonst ist der gespeicherte Humus wiederum verloren. Als Klimaschutzmaßnahme ist nur eine dauerhafte und langfristige Bewirtschaftungsänderung für eine Humuserhöhung wirksam.

Es geht bei der Bewertung des Humusaufbaus im Sinne des Klimaschutzes nicht nur um die Beurteilung der Veränderung des Humusgehaltes, sondern v.a. auch um die Beurteilung der Veränderung der Treibhausgas- bzw. Kohlenstoff-Flüsse, eingebettet in ein definiertes Konzept an wirkungsvollen, langfristigen Maßnahmen. Das bedeutet etwa, dass ein Aufbau von Humus im Boden auf Basis überhöhter Kohlenstoffflüsse in die Böden sowohl dem Klima als auch dem Grundwasser mehr schaden kann, als der erzielte Humusaufbau im Boden Positives bewirkt. Dies passiert, wenn ein großer Anteil des Flusses an organischem Material (C und N) im Boden innerhalb kurzer Zeit wiederum in der Atmosphäre oder im Grundwasser landet.

Humusaufbau und dessen Erhalt erfolgt in erster Linie durch geeignete Fruchtfolgen mit humusmehrenden und auch mehrjährigen Kulturen, der Ausbringung organischer Dünger, dem Anbau von Begrünungen, Maßnahmen zur Förderung der unterirdischen Biomasse sowie durch reduzierte Bodenbearbeitung. Ein verbessertes Wassermanagement kann zusätzlich durch die Produktionstechnik erreicht werden. Dies umfasst die Wahl von wasserkonservierenden Bodenbearbeitungsmaßnahmen, geeigneten Fruchtfolgen und mit den standortbedingten Wasserressourcen abgestimmten Anbauterminen. Bei den im Folgenden genannten Mengenangaben ist, wie bereits erwähnt, zu beachten, dass eine Steigerung des Humusgehaltes nur innerhalb standörtlich vorgegebener Grenzen möglich ist.

## 2.2 Maßnahmen auf Ackerflächen zum Humusaufbau bzw. zur Humuserhaltung

### 2.2.1 Optimierung der Fruchtfolge

Die Bepflanzung sowie deren Management bestimmen den Ein- und Austrag von organischem Kohlenstoff in Ackerböden, folglich kann über die Wahl der Feldfrüchte der Kohlenstoffvorrat im Boden beeinflusst werden. Eine Reduzierung der Schwarzbrachefläche zugunsten von optimal bewirtschafteten Flächen, Belassen der Ernterückstände am Feld sowie der vermehrte Anbau von tiefwurzelnden Kulturen können den Kohlenstoffvorrat im Ackerboden erhöhen. Ebenfalls kann sich eine mehrgliedrige Fruchtfolge positiv auf den Kohlenstoffgehalt im Boden auswirken. Dabei ist auf den abwechselnden Anbau von humuszehrenden und humusmehrenden Früchten zu achten, wobei insbesondere die Bodenbearbeitungsintensität auf die Dynamik des Humusgehaltes einen wesentlichen Einfluss hat. In der Abfolge der Kulturen sollten Schwarzbrachen vermieden werden. Werden Futterleguminosen(gemenge) oder Körnerleguminosen statt Getreide angebaut, wird durch die Knöllchenbakterien der Leguminosen Luftstickstoff in den Boden gebracht, wodurch der Einsatz von Stickstoffdünger reduziert werden kann und Stickstoff für den Humusaufbau bereitgestellt wird.

Die Flächen sollten eigentlich niemals brachliegen und brauchen – so wie im natürlichen System auch vorgesehen - ganzjährig lebende Pflanzen. Vor allem der Winterbegrünung kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu.

Weiters gibt es die Möglichkeit die Flächenleistung durch Etagenwuchs zu erhöhen – also durch Mischkulturen, Untersaaten und möglichst vielseitige Begrünungen. Es geht dabei nicht nur um die Leistungen der einzelnen Pflanzen, sondern um Pflanzenkombinationen, die sich gegenseitig unterstützen. Jede Pflanze hat auch andere Wurzelausscheidungen und fördert dadurch ein unterschiedliches Spektrum an Mikrobiologie. Je vielfältiger das Mikrobiom des Bodens, desto stabiler ist das System und desto weniger haben Krankheitserreger eine Chance, sich ungehindert vermehren zu können. Humusaufbau benötigt aktive nachhaltige Bewirtschaftung – je besser das Wachstum, desto mehr CO<sub>2</sub> wird gebunden.

Im Mittel können durch die Implementierung einer angepassten Fruchtfolge  $230 \pm 130 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in Ackerböden gespeichert werden (Bolinder et al., 2012; West und Post, 2002; Poeplau and Don, 2015; Minasny et al., 2017, Tiefenbacher et al., 2021). Dabei ist

jedoch zwischen einzelnen Fruchtarten zu differenzieren. Hackfrüchte wie Kartoffeln wirken sich deutlich negativ auf die Humusreproduktion aus mit Werten von -620 bis -1.500 kg Kohlenstoff  $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$ , je nach angewandter Humusbilanzierungsmethode und Bodenqualität. Feldfutterbau mit Klee gras (Aufwuchs abgefahren) hat dagegen einen sehr positiven Beitrag zur Humusreproduktion mit +76 bis +1.400 kg Kohlenstoff  $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  (Brock et al. 2008, Tab. 6.16).

## **2.2.2 Organische Düngung**

### **Allgemein**

Organische Dünger wie Kompost, Stallmist oder Gülle tragen ebenfalls zum Humusaufbau und Humuserhalt bei und können zur Bestandesführung eingesetzt werden. Ihre Wirkung auf Boden und Ertrag hängt von der Düngerart und -menge, der Qualität der Dünger sowie Zeitpunkt und Art der Ausbringung ab.

### **Stallmist/Gülle (Hofdünger)**

Mit Hofdüngern wird organisches Material in unterschiedlicher Menge dem Boden zugeführt. Diese können allerdings über hohe Konzentrationen von leicht abbaubarem organischem Material verfügen, dass rasch von den Bodenmikroorganismen umgesetzt/mineralisiert werden kann. Diese erhöhte mikrobielle Tätigkeit kann zu einer Reduktion des Kohlenstoffvorrates im Boden führen (Shahbaz et al., 2018).

Die potentielle Kohlenstoffsequestrierung (Kohlenstoffbindung) von Hofdüngern lag bei 160 (Don et al., 2018), 267 (BMLFUW, 2015), 300 (Tiefenbacher et al., 2021), 400 (Freibauer et al., 2004) und 450 kg C  $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  (Minasny et al., 2017) in der obersten Bodenschicht (0-20/30 cm), wobei dies von den jeweiligen klimatischen Bedingungen, der Art und applizierten Menge des Düngers, sowie dem Kohlenstoffgehalt des Bodens und der Bodenart beeinflusst wurde. Allerdings kann die Ausbringung von Hofdüngern als Kohlenstoff- und Nährstoffumverteilung von der Grünland- zur Ackerfläche angesehen werden (Schlesinger und Amundson, 2018).

Wichtig ist hierbei auch die möglichst verlustfreie Ausbringung (Zeitpunkt, Technik) und Lagerung (z. B. Abdeckung von Güllegruben) von organischen Düngern.

## Kompost

In keinem Bereich können Kreisläufe so gut geschlossen werden wie in der Landwirtschaft. Der Boden als Grundlage für die Produktion von Nahrungsmitteln und nachwachsenden Rohstoffen dient auch wieder als Senke für die organischen Reststoffe. Als Kompost, eventuell angereichert mit thermochemisch umgewandelten organischen Produkten (z. B. Bio-kohle – siehe Anhang), stellen diese „Abfälle“ ein veredeltes Produkt dar, das nicht nur Nährstoffe liefert, sondern auch als Kohlenstoffsенke fungiert und den Boden, seine Struktur und Funktionen langfristig verbessert. Im Zuge des biologischen Ab- und Umbauprozesses durch Kleinlebewesen und Mikroorganismen wird der Kohlenstoff, der als CO<sub>2</sub> bei der Photosynthese gebunden und in Biomoleküle eingebaut wurde, wieder als CO<sub>2</sub> freigesetzt. Allerdings kann man die Kohlenstoffverluste während der Kompostierung reduzieren und den biologischen Prozess dahingehend optimieren, dass weniger Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> an die Atmosphäre verloren geht, sondern in einer stabilen Form zum Großteil im Kompost und in der Folge im Boden verbleibt. Die Stabilisierung ist jedenfalls wichtig, um Kohlenstoff im Boden zu speichern. Eine zentrale Rolle spielt dabei die optimale Prozessführung. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, dass die notwendige Belüftung moderat erfolgt. Sehr intensive Belüftung führt rasch zu einem reifen Kompost, fördert allerdings die Mineralisierung der organischen Substanz und daher die Bildung von CO<sub>2</sub>. Um stabile Kohlenstoffverbindungen aufzubauen, ist daher vor allem Zeit erforderlich. Für qualitätsvolle Komposte im Sinne langfristig stabiler Organik sind Prozesszeiten von mindestens 6 eher sogar 12 Monaten und länger realistisch.

Ausgangsmaterialien für Komposte sind beispielsweise:

- Biogene Abfälle aus Märkten, Haushalten, Gärten, Gewerbe, Industrie und Landwirtschaft, Gemeinden (Grün- und Strauchschnitt),
- Entwässerte Biogasgülle und Gärreste,
- Stallmist und
- Klärschlamm.

Vielfältige Mischungen der organischen Ausgangsmaterialien führen zu einem hochwertigen Produkt. Aus den organischen Bestandteilen des reifen Komposts werden durch Mineralisierung langsam die für Pflanzen notwendigen Nährstoffe freigesetzt. Pyrolyseprodukte aus organischen Abfällen können durch ihre besonderen Eigenschaften zur Bodenverbesserung und Kohlenstoffspeicherung beitragen. Qualitätskriterien garantieren, dass keine Schadstoffe im Boden verteilt werden, sondern dass über lange Zeiträume Humusaufbau

stattfindet und langfristig die Fruchtbarkeit des Bodens gesichert ist. Nur über einen Prozessschritt wie die Kompostierung oder die Pyrolyse können wertvolle Materialströme aus der Abfallwirtschaft ausgeschleust und betriebssicher in den landwirtschaftlichen Kreislauf eingebracht werden.

Auf landwirtschaftlichen Flächen wird Kompost aufgebracht, um das Pflanzenwachstum, die mikrobielle Tätigkeit, die Erträge und den Kohlenstoffvorrat im Boden zu erhöhen (Martínez-Blanco et al., 2013). Langzeitstudien zeigten, dass die Ausbringung von Kompost den Kohlenstoffvorrat im Boden tatsächlich erhöht (Diacono and Montemurro, 2011; Lehtinen et al., 2017).

Unter den organischen Düngern weist Kompost das höchste Potenzial zur Kohlenstoffsequestrierung auf; jenes liegt zwischen  $730 \pm 270$  (Minasny et al., 2017) und  $1010 \pm 390$  kg Kohlenstoff  $\text{ha}^{-1} \text{a}^{-1}$  (BMLFUW, 2015; Abbildung 1). Wiesmeier et al. (2020) stellen fest, dass die Verwendung externer Kohlenstoffquellen wie z. B. Kompost für den Klimaschutz nicht in dem Ausmaß relevant ist, da der Kohlenstoff vor allem aus landwirtschaftlichen Betriebsabfällen nur räumlich versetzt bzw. lokal angereichert wird.

## **Transfermulch**

Beim sogenannten Transfermulch-System wird Pflanzen-Mulch von einer „Geberfläche“ entnommen und für eine „Nehmerfläche“ benutzt. Das System ist insbesondere für viehlose Biobetriebe eine gute Alternative zum Mulchen. Transfermulch aus Futterleguminosenbeständen (z. B. Luzerne oder Klee gras) eignet sich für Reihen- bzw. Dammkulturen wie Mais, Sonnenblumen oder Kartoffeln, die von dem aus dem Mulch freigesetzten Stickstoff profitieren können. Auf dem Geberfeld fördern die Futterleguminosen die Humusreproduktion und Biodiversität und sind eine wichtige, flexibel einsetzbare Stickstoffquelle im Betrieb. Durch die Mulchabdeckung im Nehmerfeld werden die Bodenverdunstung reduziert, Beikräuter unterdrückt und die Bodenfruchtbarkeit gefördert. Eine Aufbringung von ca.  $70 \text{ m}^3$  Klee gras – Mulch ergibt nach Abzug der Rotteverluste eine Kohlenstoffzufuhr von knapp einer Tonne C. Derzeit werden noch Fragen zum optimalen Ausbringungszeitpunkt, der Effizienz der Beikrautunterdrückung, dem Ausmaß der Wasserersparnis, der mittel- bis langfristigen Entwicklung der Bodenhumusgehalte, die Wirkung auf Krankheiten und Schädlinge sowie die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme untersucht.

### 2.2.3 Bedarfsgerechte mineralische Düngung - Stickstoff

Eine bedarfsgerechte mineralische Stickstoffdüngung beeinflusst den Kohlenstoffvorrat im Boden auf zwei unterschiedliche Arten. Erstens fördert das Aufbringen von mineralischen Stickstoffdüngern die Primärproduktion (Erträge) der angebauten Pflanzen, die das über Photosynthese umgewandelte Kohlendioxid in ihren ober- und unterirdischen Pflanzenteilen speichern. Hierbei gelangt Kohlenstoff vor allem über die Wurzeln und deren Exsudate in den Bodenkörper und fördert dort die Anreicherung des Kohlenstoffvorrates (Campbell et al., 2000). Folglich kann eine optimale Stickstoffversorgung des Bodens ein entscheidendes Element für deren Kohlenstoffspeicherung sein (van Groenigen et al., 2017). Andererseits kann die Stickstoffdüngung auch die biologische Zersetzung der Streu und der organischen Substanz im Boden fördern (Recous et al., 1995), was zur Minderung des Kohlenstoffvorrates beiträgt. Das Gleichgewicht zwischen Auf- und Abbau des Kohlenstoffspeichers im Boden hängt sowohl von standortspezifischen als auch von ökosystemaren Faktoren ab. In einer Metastudie konnte eine optimale Versorgung mit Stickstoff in Folge mineralischer Düngung den Kohlenstoffvorrat im Boden um 3,5 % erhöhen (Lu et al., 2011), während eine andere globale Metaanalyse zum Schluss kam, dass eine Stickstoffdüngung den Kohlenstoffvorrat im Boden reduziert (Ladha et al., 2011).

In Feldstudien lag die potentielle Kohlenstoffsequestrierung in der obersten Bodenschicht (0-20/30 cm) bei 0 (Freibauer et al., 2004; Tiefenbacher et al., 2021), 58 (BMLFUW, 2015) und  $320 \pm 290 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Minasny et al., 2017), wobei angesichts der großen Streuung das Kohlenstoffsequestrierungspotenzial einer Stickstoffdüngung ohne Berücksichtigung der Herstellung als neutral bis leicht positiv zu bewerten sein dürfte.

### 2.2.4 Belassen bzw. Einarbeitung von Ernteresten

Der Begriff Erntereste umfasst oberirdische (Stroh, Rübenblätter) und unterirdische Pflanzenbestandteile (Wurzeln und deren Exsudate). Durch das Belassen bzw. die Einarbeitung von Ernteresten kann der Kohlenstoffvorrat im Boden erhöht werden (Lehtinen et al., 2014), wobei die Menge der Erntereste stark von der landwirtschaftlichen Managementstrategie abhängt. In Systemen, wo das Stroh als Einstreu, Futter oder für die thermische Energieproduktion genutzt wird, verbleiben zunächst nur Stoppeln am Feld. Diese Praktik verringert die Menge der Erntereste maßgeblich (Soane et al., 2012). Allerdings kann bei der Verwendung als Einstreu oder Futter durch die Rückführung von Wirtschaftsdünger ein Teil dieses Verlustes wieder wettgemacht werden. Höhere Erträge von Ernteresten weisen

Mais und mehrjährige Kulturen auf, während bei Hackfrüchten (Kartoffel) ein geringer Anteil an Ernteresten am Feld verbleibt (Don et al., 2018).

Die gesichtete Literatur ist sich hinsichtlich der potentiellen Kohlenstoffsequestrierung durch die Einarbeitung von Ernteresten ziemlich einig und weist im Mittel eine jährliche Rate von  $200 \pm 50 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ y}^{-1}$  (BMLFUW, 2015; Minasny et al., 2017; Freibauer et al., 2004) auf.

### **2.2.5 Zwischenfrüchte/Gründüngung**

Der Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten hat vielfältigen Nutzen für das Anbausystem. Mit Leguminosen als Zwischenfrüchten wird Luftstickstoff gebunden, Nährstoffe werden in der Pflanzenmasse gespeichert und den Nachfrüchten bereitgestellt, Beikräuter werden unterdrückt und die Bodenstruktur wird verbessert. Außerdem können Begrünungen einen Beitrag zum Erosionsschutz und zur Humusversorgung der Böden liefern. Der gezielte Einsatz von Begrünungen kann daher auch Lösungsansätze für die Herausforderungen der reduzierten Bodenbearbeitung bieten. Reduzierte Bodenbearbeitung lieferte beim biologischen Anbau von Winterweizen und Körnermais in Verbindung mit dem Zwischenfruchtanbau (Gelbsenf bzw. Sommerwicke vor Weizen, Winterwicke und ein Gemenge aus Winterwicke, Buchweizen, Phacelia und Leindotter vor Mais) bei Feldversuchen in der Schweiz aufgrund verbesserter Beikrautunterdrückung und erhöhtem Stickstoffangebot durch die Zwischenfrüchte ähnlich hohe Erträge wie eine Kontrollvariante mit Pflugeinsatz (Wittwer et al., 2013).

In der Praxis werden unterschiedliche Begrünungssysteme (Zwischenfrüchte – winterhart bzw. abfrostend, Untersaaten) mit der reduzierten Bodenbearbeitung kombiniert und ausprobiert. Dabei ist es entscheidend, die für das eigene Anbausystem und den eigenen Standort geeignete Gründüngung zu finden, damit die folgenden Hauptfrüchte von den Zwischenfrüchten profitieren können. Die Auswahl geeigneter Arten/Sorten/Gemenge sowie Anbau-terminen spielen im Hinblick auf die Nährstoff-Mineralisierung, den Beikrautdruck, die Humusanreicherung und den Ertrag der Folgekultur für den jeweiligen Standort und Boden eine wichtige Rolle. Wichtig sind auch die Verwendung einer geeigneten Technik und der optimale Zeitpunkt bzw. die optimale Methode für die Einarbeitung der Begrünungen.

Häufig werden verschiedene Gras- und Kleearten als Zwischenfrüchte angebaut, aber auch Roggen und verschiedene Kreuzblütler. Zwischenfrüchte werden entweder als Futter für



Wiederkäuer verwendet oder dienen der Bodenverbesserung (Gründüngung). Wenn die Zwischenfrüchte am Feld verbleiben, wird über das zusätzliche Pflanzenmaterial der organische Kohlenstoffgehalt im Boden erhöht. Folglich kann in Marktfruchtbetrieben durch den Anbau von Zwischenfrüchten eine positive Humusbilanz erzielt werden. Zwischenfrüchte bzw. Gründüngung sollten insbesondere vor Hackfrüchten angebaut werden, da diese stark humuszehrend wirken. Werden winterharte statt abfrostdende Zwischenfrüchte verwendet, hat das mehrere Vorteile. Winterharte Zwischenfrüchte stehen länger am Feld und bilden tiefere Wurzeln aus. Der Ackerboden ist damit länger bedeckt (weniger Erosion) und besser durchwurzelt.

Im Oberboden (0-15 cm) kann über eine Gründüngung mit Luzerne  $180 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  sequestriert werden (Blanco-Canqui et al., 2017). Darüber hinaus, zeigte eine Metastudie, dass durch die Implementierung von Zwischenfrüchten im Vergleich zu einer Schwarbrache im Mittel  $320 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  im Oberboden (0-20 cm) gespeichert werden können (Poeplau und Don, 2015). Bei „realen“ Fruchtfolgen (Begrünung nur alle 3 bis 5 Jahre) ist allerdings mit geringeren Werten (ein Drittel bis ein Fünftel dieses Wertes) zu rechnen (Don, 2022, pers. Mitt.). Ebenfalls kann über Klee gras Kohlenstoff in Ackerböden sequestriert werden, nach dem ersten Jahr wurden  $30 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  im Oberboden (0-30 cm) gespeichert (Minasny et al., 2017), nach zweijährigen Zwischenfruchtanbau mit Klee gras konnten bereits  $168 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Tidåker et al., 2014) und nach 5 Jahren  $360 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  gespeichert werden (Bolinder et al., 2012). Aus Langzeitversuchen abgeleitete Humusreproduktionsleistungen ergeben demgegenüber einen höheren Beitrag von Klee gras-Gründüngung (Aufwuchs belassen und gemulcht) zur Humusreproduktion von  $+260$  bis  $+2.200 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ , je nach angewandter Humusbilanzierungsmethode und Bodenqualität (Brock et al. 2008, Tab. 6.16).

### 2.2.6 Ausgeglichener Wasserhaushalt

Der Wasserhaushalt beeinflusst maßgeblich die Wachstumsbedingungen der Pflanzen und somit auch das Potenzial Kohlenstoff zu binden und Humus aufzubauen. Durch den Klimawandel kommt es vermehrt zu Trockenphasen, aber auch Starkregenereignissen. Beides kann im Extremfall bis zu Totalausfällen führen.

Die Managementmöglichkeiten sind limitiert, umso wichtiger ist es die verfügbaren Strategien anzuwenden.

Hecken und Windschutzgürtel, so wie Agroforstsysteme, sorgen bei richtiger Instandsetzung, für mehr Wasserverfügbarkeit, durch eine Reduzierung der Austrocknung durch Winde, sowie erhöhte Taubildung, Verdunstung und Beschattung.

Weiters wird Erosion (Wind und Wasser) vermindert und durch die dichte und, je nach Baumart, tiefe Durchwurzelung, helfen die Bäume überschüssiges Wasser entlang der Wurzeln in die Tiefe zu Transportieren. Bei Wasserknappheit können Sie, im Vergleich zu einjährigen Kulturen, Wasser aus tiefen Schichten verfügbar machen.

Ein vor allem in (leichten) Hanglagen bewährtes Wassermanagement-System, welches es ermöglicht den Wasserhaushalt in der Fläche zu regulieren und zu optimieren ist das Key-Line-System. Durch eine Bewirtschaftung, welche weitgehend parallel zu den Höhengeschichtlinien erfolgt, versickert Niederschlagswasser vermehrt an Ort und Stelle und erhöht somit das verfügbare Wasser im Boden und in Grundwasserreservoirs. Zusätzlich kommt es durch dieses Bremsen des Wassers zu weniger Verlust durch Abfluss, zu weniger Bodenverlust durch Erosion und zu einer Reduzierung des Hochwasserpotenzials in Tallagen.

### **2.2.7 Bewässerung**

In Zeiten von Trockenstress wird durch die Beregnung das pflanzenverfügbare Wasser im Boden erhöht, dadurch erhöht sich die Primärproduktion, aber auch die Mineralisation von organischer Substanz im Boden (Chenu et al, 2019).

Der Einfluss der Beregnung auf den Kohlenstoffvorrat im Oberboden (0- 20/30 cm) wird in gemäßigten Klimazonen häufig negativ  $-114 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (BMLFUW, 2015) oder neutral  $0 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Freibauer et al., 2004; Tiefenbacher et al., 2021) bewertet. Auf globaler Ebene wird die Beregnung als positiv für den Kohlenstoffvorrat im Boden bewertet  $75 \pm 25 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  (Meena et al., 2020), da während Trockenperioden ohne Beregnung kein Pflanzenwachstum erzielt werden kann.

### **2.2.8 Agroforstsysteme**

Agroforstsysteme (Kombination von Bäumen und Sträuchern mit Ackerkulturen im „Stockwerksaufbau“) sind aus mehreren Gründen für den Humusaufbau und die Bodenfruchtbarkeit relevant. Zum einen verbessern und regulieren sie den Wasserhaushalt (siehe 2.2.6)

und vermindern den Bodenverlust durch Erosion, zum anderen legen Studien dar, dass auch das Kohlenstoffsequestrierungspotenzial von Agroforstsystemen einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der Klimaziele beisteuern können. Es können mittlere Kohlenstoffsequestrierungsraten von  $725 \text{ kg} \pm 100 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  erreicht werden. (Tiefenbacher et al., 2021; Soussana et al., 2019). Insgesamt kann auch eine höhere Gesamtproduktivität (Biomasse) auf der Fläche hervorgehoben werden.

### **2.2.9 Direktsaat**

Bodenbearbeitung kann zu Destabilisierung der Bodenaggregate und erhöhter Erosion führen und steigert die Mineralisierung der organischen Substanz im Boden, folglich haben eine reduzierte Bodenbearbeitung oder Direktsaat eine positive Wirkung auf den Kohlenstoffgehalt im Boden (Chenu et al., 2019).

Im Mittel können durch die Direktsaat  $300 \pm 100 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in Ackerböden gespeichert werden (Minasny et al., 2017; Freibauer et al., 2004).

### **2.2.10 Reduzierte Bodenbearbeitung**

Mit einer reduzierten Bodenbearbeitung können im Mittel zusätzlich  $370 \pm 25 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  in der obersten Bodenschicht von Ackerböden gespeichert werden (Freibauer et al., 2004; Minasny et al., 2017; BMLFUW, 2015). Bezogen auf das gesamte Bodenprofil ist der zusätzliche Kohlenstoff-Gewinn jedoch begrenzt (Powlson et al. 2014, Spiegel 2012, Luo et al. 2010).

### **2.2.11 Biologische Landwirtschaft als Maßnahmenbündel**

In der biologischen Landwirtschaft gilt der Grundsatz: „Wir düngen nicht die Pflanze, wir bauen die Bodenfruchtbarkeit und die Humusqualität auf“. Natürliche Prozesse und Kreisläufe stehen in der Bio-Landwirtschaft im Vordergrund, um die Pflanzen zu ernähren und die Fruchtbarkeit des Bodens zu erhalten bzw. zu steigern. Durch Wurzelausscheidungen von Pflanzen werden schwer zugängliche Nährstoffe verfügbar gemacht; Pflanzenreste dienen als Nahrung für Bodenorganismen, die wiederum Nährstoffe für die Pflanzen zugänglich

machen. Deshalb ist es wichtig, die Bodenlebewesen wie „Tiere im Stall zu füttern“. Zwischen Boden und Pflanzen gibt es viele wechselseitig beeinflussende Prozesse, in der biologischen Landwirtschaft werden diese Kreisläufe respektiert und gefördert (Wachendorf et al., 2018). Die biologische Wirtschaftsweise ist u.a. gekennzeichnet durch das Verbot der Verwendung von leicht löslichen synthetischen mineralischen N-Düngern. Daher muss der Stickstoffbedarf aus anderen Quellen gedeckt werden.

Das sind hauptsächlich eine gut geplante, vielgliedrige Fruchtfolge mit stickstoff-fixierenden Futter- und Körner-Leguminosen, die Nutzung von organischem Material als Düngemittel (z. B. Wirtschaftsdünger, Kompost) und der verstärkte Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten sowie eine ständige Begrünung.

Die einzelnen Unterpunkte wurden bereits zuvor thematisiert und führen alle zu einer Anreicherung von Kohlenstoff in Ackerböden. Durch eine optimale Kombination dieser Maßnahmen im Rahmen einer biologischen Bewirtschaftung mit Einsatz von externen Kohlenstoffquellen kann der Kohlenstoffvorrat im Boden um  $450 \pm 210 \text{ kg Kohlenstoff ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$  erhöht werden (Gattinger et al., 2012). Allerdings stagniert derzeit der Anteil an Feldfutterflächen, während der von Flächen mit Soja, Ölkürbis, Sonnenblume und Hirse zunimmt. Eine aktuellere Auswertung des Thünen Instituts von 17 Studien (Sanders und Heß, 2019) zeigt, dass bei ökologisch bewirtschafteten Flächen eine um  $256 \text{ kg C/ha}$  und Jahr höhere C-Speicherung im Vergleich zu konventionell bewirtschafteten erreicht werden konnte. In 78 % der Fälle war die Kohlenstoffspeicherung im ökologischen Landbau höher. Bei 20 % erzielte die konventionelle Bewirtschaftung eine höhere Speicherung.

### **2.2.12 Einsatz von Biokohle**

Eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des organischen Kohlenstoffgehalts im Boden besteht in der Einmischung besonders kohlenstoffreicher Bodenhilfsstoffe. Das dafür geeignetste Material ist qualitätsgesicherte Biokohle, das feste Produkt von Pyrolyse-Prozessen. Diese thermochemische Umwandlung (Pyrolyse) von Biomasse erfolgt in anlagentechnisch hoch entwickelten Pyrolyse-Reaktoren, welche den chemisch analog ablaufenden Prozess der traditionellen Holzkohle-Herstellung auf weniger als 1 Stunde verkürzen. Verkohlungsanlagen sind auch Energiegewinnungsanlagen. Im Gegensatz zu Heizwerken werden hierbei aber nur rund 50% des Kohlenstoffs in Energie umgewandelt. Die restlichen 50% des Kohlenstoffs sind in der Biokohle fixiert. (<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/fi>

les/medien/378/publikationen/texte\_04\_2016\_chancen\_und\_risiken\_des\_einsatzes\_von\_biokohle.pdf). Die dabei produzierte Biokohle zeichnet sich durch Gehalte von 50-90 % organischen, gegen Abbau sehr widerstandsfähigen Kohlenstoff aus. Die für die Produktion erlaubten Ausgangsmaterialien pflanzlichen Ursprungs sind in ÖNORM S 2211 geregelt und bestehen aus Reststoffen, für welche keine andere sinnvolle stoffliche Verwertung in Frage kommt. Pyrolytisch hergestellte Biokohle aus pflanzlichen Ausgangsstoffen wird auch als Pflanzenkohle bezeichnet.

Je nach Ausbringungsrate auf landwirtschaftliche Böden erhöht Biokohle die Größe des organischen Bodenkohlenstoff-Pools. Obwohl strukturell sehr verschieden von Humusformen, welche durch biologischen Abbau von pflanzlichen und tierischen Reststoffen entstanden sind, fördert Biokohle jene Bodeneigenschaften, welche für das Pflanzenwachstum auf einem humusreichen Boden nützlich sind: erhöhte Wasserspeicherfähigkeit, Verringerung der Nährstoffverluste, Reduktion der Verdichtungsgefahr, Verbesserung der Lebensbedingungen für Bodenmikroorganismen. Allerdings müssen auch mögliche Nachteile von einseitigen, zu hohen Biokohlegaben berücksichtigt werden, wie z. B. Nährstoff-Festlegung und die Verschiebung des C/N-Verhältnisses. Biokohle wird daher üblicherweise gemeinsam mit Kompost oder als Zuschlagsstoff zu Bodenverbesserungsmitteln angewendet, um diese Risiken zu eliminieren. Weiters ist darauf zu achten, dass nur Biokohle, welche die ÖNORM S 2211 erfüllt bzw. nach European Biochar Certificate (EBC) zertifiziert ist, in landwirtschaftlichen Böden zum Einsatz kommt. Dies garantiert die Einhaltung der Grenzwerte für potentielle Schadstoffe, welche mit der Biokohle in den Boden gelangen könnten. Optimalerweise wird eine Biokohle eingesetzt, welche auf die aktuelle Standortsituation des Bodens Rücksicht nimmt und mit ihren Eigenschaften darauf abgestimmt ist, spezifische Standortprobleme am Ausbringungsort zu verbessern.

Die langfristige Bindung von biokohlebürtigem Kohlenstoff im Boden ist über Jahrzehnte bis Jahrhunderte gesichert. Der Kohlenstoff, der sich in diesem Zeitraum im Boden statt in der Atmosphäre befindet, kann nicht zur globalen Klimaveränderung beitragen. Der Einsatz von Biokohle wird daher vom Zwischenstaatlichen Ausschuss für Klimaänderungen (IPCC) als eine der Technologien zur langfristigen Entfernung von CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre gelistet. Die Landwirtschaft kann somit durch einen standortangepassten Einsatz von Biokohle die Vorteile sowohl der Kohlenstoffbindung als auch der lokalen Bodenverbesserung und nachhaltigen Bodenbewirtschaftung lukrieren.

### 2.2.13 Schlussfolgerungen zu den Ackerbaumaßnahmen

Die beste Wirkung kann erzielt werden, wenn Ackerböden mit unterschiedlichen Pflanzen möglichst dauerhaft bewachsen sind (z. B. mehrjähriges Feldfutter, Klee gras, Wechselwiese in der Fruchtfolge). Es stehen aber auch noch zahlreiche weitere Maßnahmen zur Humuserhaltung oder zum Humusaufbau zur Verfügung. Dazu gehören das Aufbringen von organischen Düngern (z. B. Stallmist, Kompost), vielfältigere Fruchtfolgen mit Zwischenfrüchten/Gründüngung, die den Boden möglichst ganzjährig bedeckt lassen oder auch der Verbleib der Ernterückstände auf dem Feld. Das längere Offenhalten von Böden (Schwarzbrache) führt immer zu Humusverlusten (-189 bis -1000 kg Kohlenstoff ha<sup>1</sup>a<sup>1</sup> in 0-20/30 cm, siehe Tiefenbacher et al., 2021).

Eine Reduzierung der Bodenbearbeitung (Tiefe und Häufigkeit) bewirkt oftmals höhere Kohlenstoffvorräte im Oberboden, nicht aber über die gesamte Bodentiefe. Auch der Einsatz von Biokohle kann je nach der Ausgangssituation und dem Bedarf des jeweiligen Bodens den organischen Kohlenstoffvorrat im Boden steigern.

Die in der Literatur genannten C-Sequestrierungspotenziale basieren meist auf Unterschieden zwischen einer Kontrolle und einer "optimalen" Bodenbewirtschaftung (z.B. organische Düngung, Einarbeitung der Ernterückstände, Zwischenfrüchte, etc.) nach etwa 20 Jahren. Wenn man allerdings die Entwicklung der Humusgehalte einer optimalen Bewirtschaftung (z.B. Einarbeiten der Ernterückstände) vom Versuchsbeginn bis 20 Jahre danach betrachtet, kann es sein, dass der Humusgehalt bestenfalls erhalten werden konnte (und die Kontrollvariante, z.B. durch intensive Bodenbearbeitung, Humus verloren hat).

Eine Kombination von Maßnahmen, z. B. verstärkte Aufbringung von organischen Düngern mit einer Reduzierung der Bodenbearbeitung und einer ganzjährigen Bodenbedeckung kann eine – begrenzte - kumulative Wirkung bezüglich Erhalt oder Steigerung der Kohlenstoffvorräte im Boden haben. Eine mineralische Stickstoffdüngung oder Bewässerung können sowohl zu einer Steigerung oder Konservierung als auch zu einer Abnahme des Humusgehalts führen. Auch hier sind die pflanzenbaulichen Maßnahmen und die Standortbedingungen von wesentlicher Bedeutung.

Bei allen Bewirtschaftungsmaßnahmen sind nicht nur die Erhöhung der Kohlenstoffvorräte, sondern auch mögliche erhöhte Emissionen von Treibhausgasen wie Lachgas und Methan sowie andere Stickstoffverluste relevant und müssen in der Klimabilanz berücksichtigt bzw. gegengerechnet werden. Die empfohlenen Maßnahmen zur Erhöhung oder Stabilisierung

des Humusgehaltes müssen jedenfalls langfristig angewendet werden, um einen nachhaltigen Effekt zu gewährleisten.

Weiters ist zu berücksichtigen, dass humusaufbauende und humuserhaltende Maßnahmen mit der guten landwirtschaftlichen Praxis und einem entsprechenden Betriebsmittelmanagement verknüpft sein müssen. Dabei ist insbesondere die optimale Nährstoffversorgung (Stickstoff) und ein adäquater Pflanzenschutz wesentlich. Für die Gesamtbilanz (CO<sub>2</sub>-Fußabdruck) sind auch allfällige Emissionen bei der Betriebsmittelproduktion zu berücksichtigen. Beispielsweise liegt das Treibhausgaspotenzial der mineralischen Stickstoffdünger-Produktion je nach Art des Stickstoffdüngers und je nach eingesetzter Form der Energie im Bereich von ca. 3 bis 8 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente pro kg N (Hoxha und Christensen, 2019).

Eine Reduktion der Stickstoffdüngung vermindert zwar den Kohlenstoff-Fußabdruck der landwirtschaftlichen Produktion, kann jedoch auch zu einer Verringerung der Biomasseproduktion führen. Dies kann einerseits den Humusgehalt auf den betroffenen Flächen beeinflussen sowie andererseits durch den Bedarf an zusätzlichen Anbauflächen die Flächenkonkurrenz erhöhen.

Weiters ist zu bedenken, dass auch die Klimawandel bedingten Temperaturerhöhungen Humusverluste beschleunigen und Bodenversiegelung eine zusätzliche Kohlenstoff Speicherung unmöglich macht (Tiefenbacher et al., 2021). Es ist daher notwendig, dass Landwirt:innen möglichst viele vorteilhafte Bewirtschaftungsmaßnahmen im Ackerbau ergreifen, um den Humus im Boden und damit die Bodengesundheit und -fruchtbarkeit sowie wichtige Bodenfunktionen, inklusive Produktions- und Klimaschutzfunktion, zu erhalten.

## **2.3 Maßnahmen auf Dauergrünland zum Humusaufbau bzw. zur Humuserhaltung**

Die Böden unter Dauergrünland sind aufgrund ihrer hohen Humusgehalte und beträchtlichen Flächengröße wichtige Speicher von organischem Kohlenstoff. Dauergrünlandböden weisen in der Regel höhere Humusgehalte und Kohlenstoff-Vorräte auf als Ackerböden (Klapp 1971, Sims und Nielsen 1986, Baumgarten et al. 2021). Der Humusgehalt beträgt in den obersten 10 cm häufig mehr als 6 %. Allerdings schwankt der Humusgehalt in Abhängigkeit von der Wasserhaushaltsstufe in einem weiten Bereich (Tabelle 1).

Tabelle 1: Kohlenstoff-Gehalt und Kohlenstoff-Vorrat in Böden unter Dauergrünland (A-Horizont, 0-10 cm Bodentiefe) in Abhängigkeit von der Wasserhaushaltsstufe

|                                  | Corg (%)    |        |        |      | Corg (t ha-1) |         |         |        |
|----------------------------------|-------------|--------|--------|------|---------------|---------|---------|--------|
|                                  | halbtrocken | frisch | feucht | nass | halbtrocken*  | frisch* | feucht* | nass** |
| <b>Anzahl der Bodenanalysen</b>  | 32          | 463    | 146    | 138  | 32            | 463     | 146     | 138    |
| <b>Minimum</b>                   | 2,7         | 2,1    | 2,0    | 3,8  | 27            | 21      | 20      | 19     |
| <b>Maximum</b>                   | 10,1        | 18,4   | 44,1   | 53,3 | 101           | 184     | 441     | 266    |
| <b>Arithmetischer Mittelwert</b> | 6,8         | 6,6    | 9,7    | 32,5 | 68            | 66      | 97      | 163    |
| <b>Median</b>                    | 6,6         | 6,2    | 8,2    | 36,2 | 66            | 62      | 82      | 181    |

Lagerungsdichte: \* = 1,0 g cm-3, \*\* = 0,5 g cm-3 (Annahmen) (Bohner 2012)

Die höheren Humusgehalte sind auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- Hohe jährliche Mengen an ober- und unterirdischen Bestandesabfällen,
- Fehlender „Verdünnungseffekt“ aufgrund nicht stattfindender Bodenbearbeitung und
- Geringere Bodenerwärmung infolge ganzjähriger und weitgehend geschlossener Vegetationsdecke.

In den landwirtschaftlich genutzten Böden besteht hinsichtlich des Humusgehaltes folgende Reihung: Böden unter Dauergrünland > Böden unter Wechselgrünland > Ackerböden (Mestdagh et al., 2006, Bohner et al., 2012).

Humusgehalt und Kohlenstoff-Vorrat werden maßgeblich vom Vegetationstyp (Artenzusammensetzung der Vegetation), von den Bodeneigenschaften (insbesondere Wärme- und Wasserhaushalt, Tonminerale, amorphe Eisen- und Aluminium-Oxide) und von der Bewirtschaftung (Düngung, Nutzungshäufigkeit) bestimmt (Bohner et al., 2016).

Der Humusgehalt von Grünlandböden ist primär vom Bodenwasserhaushalt abhängig (Tabelle 1). Daher sind Moorböden die bedeutsamsten Speicher von organischem Kohlenstoff gefolgt von den hydromorphen Mineralböden. Der Humusgehalt von Grünlandböden ist umso höher, je ungünstiger die Lebensbedingungen für Bodenorganismen sind, v.a. je niedriger die Bodentemperatur und je höher die Bodenfeuchte ist (Sims und Nielsen, 1986, Kleber und Stahr, 1995). Unter sonst gleichen Bedingungen weisen tonreiche Grünlandböden



meist höhere Humusgehalte auf als sandreiche (Alvarez und Lavado, 1998, Henderson et al., 2004, Böhner et al., 2007). Durch die Bindung an Tonminerale wird der Humus besser vor mikrobiellem Abbau geschützt und kann sich so in tonreichen Grünlandböden stärker anreichern. Für die Kohlenstoffspeicherung und -stabilisierung haben auch amorphe Eisen- und Aluminium-Oxide eine große Bedeutung, insbesondere im Unterboden (Percival et al., 2000, Böhner et al., 2016).

Die Humusgehalte können durch unterschiedliche Bewirtschaftung und kulturtechnische Maßnahmen nur langfristig innerhalb verhältnismäßig enger Grenzen verändert werden (Smith 2004, Henderson et al. 2004, Böhner et al. 2016). In langjährig gleich bewirtschafteten Grünlandböden stellt sich allmählich ein Gleichgewicht zwischen Humusabbau und Humusaufbau und ein standort- und bewirtschaftungsspezifisches Humusniveau ein.

Die wichtigsten Maßnahmen für den Erhalt oder die Erhöhung des Kohlenstoff-Vorrates in landwirtschaftlich genutzten Böden sind u.a. eine standortangepasste Grünlandbewirtschaftung, der Erhalt von Dauergrünland sowie der Erhalt oder die Wiederherstellung intakter (hydrologisch weitgehend ungestörter) Moore. Eine Wiedervernässung von Mooren wird nur in Einzelfällen möglich und sinnvoll sein.

### **2.3.1 Erhalt von Dauergrünland mit humuserhaltender bzw. –fördernder Grünlandbewirtschaftung**

Generell ist der Humusgehalt in Grünlandböden immer dort höher, wo mehr Pflanzenstreu (ober- und unterirdische pflanzliche Biomasse, Wurzelexsudate) anfällt. Die Menge an Pflanzenstreu ist primär von der floristischen Zusammensetzung des Pflanzenbestandes und von der Intensität der Nutzung abhängig (Klapp, 1971, Böhner und Herndl, 2011). In Grünlandböden sind abgestorbene Wurzeln, Wurzelteile und Hyphen von Mykorrhizapilzen sowie Wurzelausscheidungen lebender Pflanzenwurzeln (Exsudate) die wichtigsten Humusbildner (Guckert, 1992, Rasse et al., 2005, Herold et al., 2014). Insbesondere Gräserwurzeln tragen wesentlich zur Humusbildung bei. Tiefwurzelnde Grünlandpflanzen (insbesondere Kräuter) können den Boden bis zu einer Tiefe von über 100 cm entscheidend mit Kohlenstoff anreichern (Fisher et al., 1994). Eine Nutzungsintensivierung, insbesondere eine Erhöhung der Weideintensität, vermindert die Wurzelmasse und die Durchwurzelungstiefe im Grünlandboden vor allem durch Förderung flachwurzelnder Pflanzenarten mit geringer Wurzelmasse (Schuster, 1964, Klapp, 1971, Böhner und Herndl, 2011, Böhner et al., 2016). Eine Nutzungsintensivierung kann daher zu einer Abnahme des Humusgehaltes im Grün-

landboden (insbesondere im Unterboden) infolge geringerer unterirdischer Bestandesabfälle führen (Bohner et al., 2016). Durch Verminderung der Weideintensität kann auf überbeweideten Flächen Humus angereichert werden (Conant und Paustian, 2002). Durch Mahd oder Beweidung wird dem Grünlandökosystem Kohlenstoff entzogen (Bohner, 2021). Eine regelmäßige Düngung mit Wirtschaftsdüngern ist daher notwendig, um den Humusgehalt im Grünlandboden zu erhalten (Asmus, 1992, Soussana et al., 2004, Bohner et al., 2016, Kühnel et al., 2019). Durch regelmäßige und reichliche Düngung mit Wirtschaftsdüngern, insbesondere mit Mist oder (Stallmist-)Kompost kann der Humusgehalt im Oberboden geringfügig erhöht werden (Kühnel et al., 2019). Allerdings findet eine Humusanreicherung nur sehr langsam und in geringem Maße statt, weil die jährliche Kohlenstoff-Zufuhr mit dem Dünger im Vergleich zum Kohlenstoff-Vorrat im Grünlandboden sehr gering ist (unter 5 %). Eine regelmäßige Mahd ohne Düngung mit Entfernung des Mähgutes führt zwar zu einer erhöhten Pflanzenartenvielfalt, bewirkt aber durch den Kohlenstoff-Export mit der Ernte einen Humusabbau (Bohner et al., 2016). Eine Düngung zur Erhöhung des Humusgehaltes im Boden ist auf artenreichen Magerwiesen und -weiden eine biodiversitätsmindernde Maßnahme. Es besteht somit ein Zielkonflikt zwischen Klimaschutz und Naturschutz (Bohner et al., 2019).

Die Umwandlung von Dauergrünland in Wechselgrünland oder Ackerland bewirkt einen Humusschwund und ist folglich auch aus Klimaschutzgründen kritisch zu sehen. Auch eine permanente Drainage kann zu Humusverlusten führen.

Für eine humuserhaltende bzw. -fördernde Grünlandbewirtschaftung sind daher folgende Maßnahmen wichtig:

- mittlere Nutzungshäufigkeit (Vermeidung einer langjährigen Übernutzung),
- Förderung von Futtergräsern mit großem und tiefreichendem Wurzelsystem (z. B. Rohr-Schwingel, Wiesen-Schwingel),
- Förderung von tiefwurzelnden Kräutern (z. B. Wiesen-Löwenzahn, Groß-Bibernelle),
- regelmäßige Düngung mit Wirtschaftsdüngern, insbesondere Mist oder (Stallmist-)Kompost und
- bodenschonendes Weidemanagement (Vermeidung einer langjährigen Überweidung).

Die Kohlenstoff-Speicherung im Grünlandboden ist bei mittlerer Bewirtschaftungsintensität (zwei bis vier Nutzungen pro Jahr, regelmäßige Düngung mit Mist oder Kompost) am höchsten (Bohner et al., 2016).

### 2.3.2 Erhalt oder Wiederherstellung von Mooren

Generell zählen Moore zu den größten terrestrischen Kohlenstoff-Speichern (Succow und Joosten, 2001). Naturnahe (nicht entwässerte, torfakkumulierende) Moore tragen wesentlich zur Kohlenstoff-Sequestrierung bei (Höper, 2007). Damit Moore ihre klimawirksame Funktion als Kohlenstoff-Speicher erfüllen können, ist ein ganzjährig hoher Wassergehalt im Moorkörper erforderlich. Allerdings haben Moore aufgrund ihrer hohen Kohlenstoff-Vorräte auch ein beträchtliches CO<sub>2</sub>-Freisetzungspotenzial. Im Falle einer Neuentwässerung werden große Mengen an CO<sub>2</sub> freigesetzt, weil infolge einer besseren Sauerstoffzufuhr die mikrobielle Torfmineralisation beträchtlich erhöht wird. Aus Klimaschutzsicht ist es daher wichtig, dass es möglichst zu keiner Neuentwässerung von Mooren kommt. In Einzelfällen besteht im Rahmen eines konkreten Projektes die Möglichkeit, Wiedervernässungen von Mooren durchzuführen. Solche Maßnahmen bedürfen klarer Interessensabwägungen zwischen Landwirtschaft und Naturschutz. Dabei sind nicht nur die unmittelbaren Auswirkungen auf wiedervernässte Flächen zu beurteilen, sondern auch die Auswirkungen auf umliegende Flächen, die ggf. damit vom Wasserhaushalt her ebenfalls verändert werden.

In Österreich werden Niedermoore unterschiedlich landwirtschaftlich genutzt und stehen teilweise aufgrund ihrer Vegetation unter Naturschutz. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen entwässerter Moore lassen sich durch eine deutliche Anhebung des Moorwasserspiegels (Wiedervernässung) reduzieren. Allerdings wird dadurch die Tragfähigkeit des Moorbodens vermindert. Die negativen Folgen sind eine schlechtere Befahrbarkeit und somit erschwerte Bedingungen bei der Mahd bzw. der landwirtschaftlichen Nutzung. Unter der Voraussetzung, dass eine Mahd möglich sein soll, sollte der mittlere Grundwasserflurabstand nach einer durchgeführten Wiedervernässung etwa 30 cm betragen (Renger et al., 2002). Es besteht hier aber jedenfalls ein Zielkonflikt zwischen Klimaschutz und Naturschutz einerseits und der landwirtschaftlichen Produktion andererseits.

Wiedervernässungsprojekte mit Außernutzungstellung werden daher nur mit intensiver Einbindung aller Betroffenen und entsprechender finanzieller Abgeltung der betroffenen Grundstückseigentümer:innen umzusetzen sein und es ist hier auf das Prinzip der Freiwilligkeit zu achten. Weitere landwirtschaftliche Nutzungen sind zum Teil möglich, müssen aber jeweils standortspezifisch geprüft werden.

# 3 Möglichkeiten zur Überprüfung der Wirksamkeit von Maßnahmen/Monitoring (auf Betriebsebene oder national)

## 3.1. Bodenuntersuchungen

Die Analyse des organischen Bodenkohlenstoffs erfolgt im Labor gemäß ÖNORM L 1080, ÖNORM EN 17505, ÖNORM 15936 (Elementaranalyse nach trockener Verbrennung). Basierend auf dem durchschnittlichen Kohlenstoffgehalt der organischen Substanz des Bodens von 58 % ergibt sich der Humusgehalt durch eine Multiplikation des analysierten  $C_{org}$ -Gehalts mit dem Faktor 1,72. Die Angabe des Humusgehaltes erfolgt meist in % oder in g/kg Feinboden.

Der Kohlenstoffvorrat kann unter Berücksichtigung der beprobten Tiefe und des Grobanteils sowie der jeweiligen Lagerungsdichte (ÖNORM L 1051, ÖNORM EN ISO 11272) berechnet werden.

Der Humusgehalt kann im Feld nur schwierig abgeschätzt werden (z. B. nur aufgrund der Färbung des Bodens), alternativ dazu können aber Methoden verwendet werden, durch die der positive Effekt des Humus angezeigt wird. Dazu zählen z. B. die Aggregatstabilität oder die Spatenprobe.

### **Aggregatstabilität**

Im Labor kann die Aggregatstabilität nach der ÖNORM L 1072 bestimmt werden.

Alternativ dazu ist der einfache Slake Test vor Ort möglich:

Dabei wird ein kleiner Klumpen Boden in eine Schale mit Löchern oder ein Netz gelegt in Wasser getaucht. Es wird die Stabilität des Bodens unter Wasser bewertet.

Sind die Aggregate des Bodens stabil, zerfällt der Klumpen in Wasser nur wenig und bleibt über Stunden im Wasser intakt. Eine Trübung des Wassers darunter ist kaum gegeben und auch nur wenig Erde fällt vom Klumpen ab. Diese Böden können bei Starkregen große Mengen an Wasser aufnehmen, sind biologisch stabil, tragfähig und gut mit Bodenleben ausgestattet. Sie halten Starkregen stand, erodieren nicht und können viel Wasser speichern.

Ist der Boden im Wasser nicht stabil und zerfällt binnen weniger Minuten, ist die Stabilität der Bodenaggregate nicht ausreichend. Diese Böden machen bei Starkregen zu, sie verschlämmen und nehmen nur wenig Wasser auf. Sie sind nicht ausreichend tragfähig und weisen zu wenig Bodenleben auf. Sie sind sehr anfällig für Erosion und können viel weniger Wasser speichern. Hier müssen dringend durch biologische Verfahren wie Zwischenfruchtanbau sowie geänderte Bodenbearbeitung Gegenmaßnahmen gesetzt werden.

Abbildung 8: Prüfung der Aggregatstabilität – Slake Test (Fotos: Johannes Zauner, Verein Boden.Leben)



## Flaschentest

Hier geht es darum die Infiltrationsrate von Böden zu bewerten, sowie auch indirekt deren biologische Aktivität und die Aggregatstabilität. Dabei werden größere intakte Bodenklumpen vorsichtig in eine abgeschnittene Plastikflasche mit Löchern am Flaschenboden gegeben. Diese Flasche wird dann in eine andere abgeschnittene Flasche gesteckt. Nun wird der Boden vorsichtig mit Wasser begossen. Das Wasser wird durch den Boden in die untere Flasche „gefiltriert“. Je nachdem wie der Boden das Wasser durchlässt beziehungsweise welche Menge an Boden durch das Wasser mitgenommen wird, sieht man deutliche Unterschiede zwischen den Böden.

Wird Wasser gut „drainiert“ und nur wenig Bodenmaterial mitgenommen, kann man davon ausgehen, dass dieser Boden große Mengen an Starkregen aufnehmen kann. Das Bodenleben ist dort intakt, die Aggregate stabil und die Speicherfähigkeit ausgeprägt. Der Boden ist somit gegen Erosion sehr stabil. Er besitzt ein optimales Porenvolumen, eine gute Speicherfähigkeit für Wasser und somit eine gute Ertragskraft.

Macht der Boden hingegen „zu“ und verschlämmt sehr leicht und lässt nur wenig Wasser durch, kann man davon ausgehen, dass der Boden wenig Infiltration bei Starkregen haben wird. Die Erosion wird diesen Boden massiv treffen. Zusammen mit wenig Speichervermögen für Wasser kann dieser Boden seine Funktionen nicht mehr erfüllen und wird daher auch weniger Erträge liefern. Hier gilt es wiederum durch schonende Bewirtschaftungsmaßnahmen und Zwischenfruchtanbau gegenzusteuern.

Abbildung 9: Aggregatstabilität – Flaschentest (Fotos: Lorenz Mayr, Verein Boden.Leben)





## Spatenprobe

Abbildung 10: Spatenprobe (Foto: Claudia Winkovitsch)



Mit der Spatenprobe (ursprünglich nach Johannes Görbing, 1930) kann man das Bruchverhalten (Übergänge), die Oberflächenstruktur, Farbe und Geruch sowie Belebtheit des Bodens im Bearbeitungshorizont beurteilen.

Anhand eines ausgehobenen Bodenblocks kann man folgende Kriterien unterscheiden:

Tabelle 2: Kriterien zur Beurteilung der Spatenprobe

| Merkmale                                     | günstig                                           | ungünstig                                                                                                 |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Größenverteilung der <u>Aggregate</u></b> | gleichmäßig kleine <u>Aggregate</u> (< 5 mm)      | inhomogene grobe Klumpen                                                                                  |
| <b>Gefügeform (Struktur)</b>                 | porös, locker, krümelig (runde <u>Aggregate</u> ) | fest, dicht, plattig, scharfkantig                                                                        |
| <b>Übergang</b>                              | allmählich                                        | abrupt - von locker zu dicht                                                                              |
| <b>Farbe</b>                                 | gleichmäßig braun bzw. dunkel                     | graue /blaue Flecken (Reduktionszonen)                                                                    |
| <b>Geruch</b>                                | erdig                                             | faulig                                                                                                    |
| <b>Ernterückstände</b>                       | in Abbau, gleichmäßig verteilt                    | frisch „einzementiert“, verpilzt, ungleichmäßig verteilt (Matte)                                          |
| <b>Durchwurzelung</b>                        | gleichmäßig, hohe Dichte, gerade Pfahlwurzel      | ungleichmäßig, Wurzelfilz auf Kluft- Flächen, wurzelleere Zonen, horizontales Ausweichen von Pfahlwurzeln |
| <b>Poren</b>                                 | zahlreiche Wurm- und Wurzelröhren (Groporen)      | wenig porös                                                                                               |
| <b>Regenwürmer*</b>                          | > 8                                               | < 4                                                                                                       |

\*...bei einer Beurteilung im Sommer können trotz hohen Besatzes in der oberen Bodenschicht keine Würmer gefunden werden.

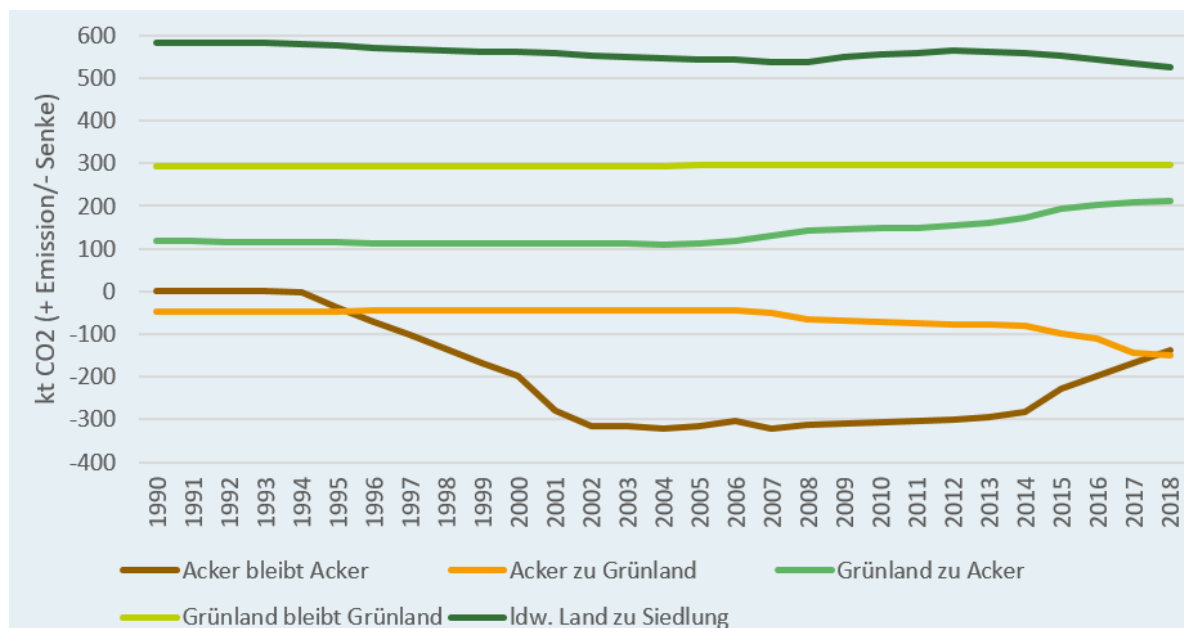
Damit stellt die Spatenprobe wichtige Zusatzinformationen zu einer Bodenanalytik zur Verfügung.



## 3.2. Bilanzierungen

### Bilanzierung auf nationaler Ebene Einbeziehung von Bodenkohlenstoff in die nationale Treibhausgasbilanzierung

Abbildung 11: CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. Senken durch Bodenkohlenstoffveränderungen in Österreichs Acker- und Grünlandböden gemäß Österreichischer Treibhausgasinventur (Umweltbundesamt 2020)



Im Anrechnungsschema der EU zur Erreichung der Treibhausgasreduktionsziele bis 2030 wird auch die Veränderung des Bodenkohlenstoffs berücksichtigt.

Im Berichtswesen zu den nationalen Treibhausgasbilanzen unter der Klimarahmenkonvention sowie zugehörigen Vereinbarungen auf EU-Ebene ist auch die Veränderung des Bodenkohlenstoffs aufgrund von Landnutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen zu schätzen und zu berichten. Dabei sind die methodischen Vorgaben der IPCC Guidelines (IPCC 2006) zu befolgen, welche einfache Methoden („Tier1“) auf Basis von „default“ Werten (wenn keine nationalen Daten und Methoden vorliegen) bis zu komplexen Methoden („Tier3“) aufgrund von nationalen Daten, Monitoring und Modellen definieren. Es ist jedenfalls zu schätzen und wenn das Ergebnis einen definierten, signifikanten Beitrag in der nationalen Treibhausgasbilanz ergibt, dann sind komplexere Methoden als „Tier1“ anzuwenden. Österreich verwendet sowohl für die Landnutzungswechsel von, zu und zwischen Ackerland und Grünland, als auch für das bestehende Ackerland und Grünland fast durchwegs nationale Daten

und höhere „Tiers“. Die nationalen Daten stammen aus den Bodeninventuren der Bundesländer, aus Dauerversuchen im Ackerland der AGES sowie aus den Bewirtschaftungsaufzeichnungen im Rahmen des INVEKOS-Systems und den landwirtschaftlichen Statistiken, aus denen die langfristigen Landnutzungsänderungen, die Bewirtschaftung und deren Veränderung abgeleitet werden (Zwischenbegrünungen, Ernterückstände, Einsatz organischer Dünger, etc). Sofern nicht durch Monitoring- oder Forschungsergebnisse besser bekannt, ist lt. IPCC Guidelines eine Abschreibung der gesamten Bodenkohlenstoffänderung durch Landnutzungswechsel oder Bewirtschaftungsänderungen im Zeitraum von 20 Jahren durchzuführen. Dieser Zeitraum wird auch in Österreich angewandt. Danach wird ein neuer Gleichgewichtszustand des Humus im Boden unterstellt. Abbildung 11 zeigt die geschätzten Kohlenstoffänderungen in Österreichs Acker- und Grünlandböden seit 1990. Folgendes ist ersichtlich: Die Senke durch Humusaufbau im Ackerland Österreichs aufgrund von ÖPUL-Maßnahmen während der letzten Jahrzehnte (was gut zu den Ergebnissen der Bodenuntersuchungen der AGES passt – vgl. mit Kapitel 1.5, 4.1.1), der Bodenkohlenstoffverlust im Grünland durch die Entwässerung organischer Böden, die Bodenkohlenstoffgewinne durch die langfristige Umwandlung von Ackerland in Grünland und die Bodenkohlenstoffverluste durch die langfristige Umwandlung von Grünland in Ackerland sowie von landwirtschaftlichen Böden in Siedlungsraum (Umweltbundesamt 2020). Die Senkenwirkung im Mineralboden durch Bewirtschaftungsänderung wird lt. IPCC jedoch immer für 20 Jahre gerechnet, daher geht der Wert auf den Ackerflächen wieder zurück.

### **Bilanzierung auf Betriebsebene**

VDLUFA - Methode:

Der Verband der landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalten in Deutschland (VDLUFA) hat 2014 einen Standpunkt zur Humusbilanzierung veröffentlicht. Die Aussage zur Humusversorgung ackerbaulich genutzter Flächen ergibt sich dabei aus der Differenz zwischen der Humusreproduktionsleistung organischer Dünger und dem anbau- und fruchtartspezifischen Humusreproduktionsbedarf der Fruchtfolge. Diese errechnet sich aus der Humusreproduktionsleistung der "humusmehrenden" und dem Humusreproduktionsbedarf der "humuszehrenden Fruchtarten":

Humusbilanz (Saldo) =

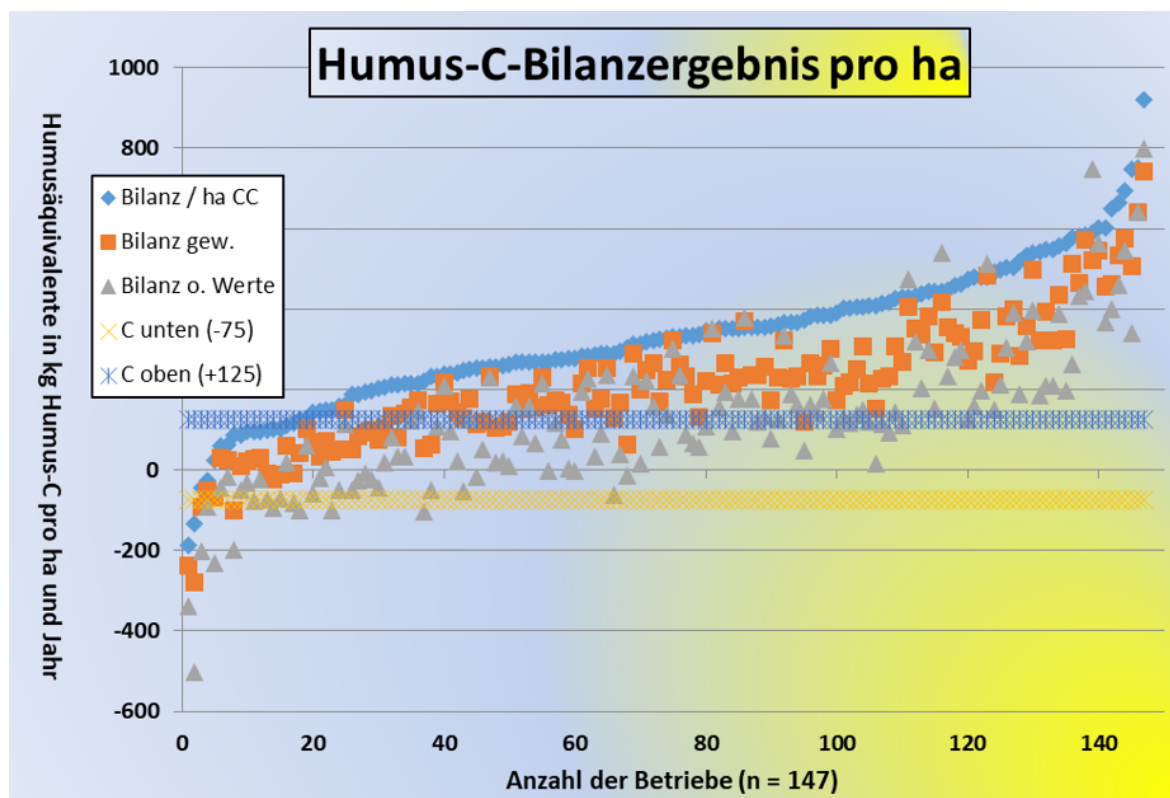
Humusreproduktionsleistung aus organischer Düngung plus  
Humusreproduktionsleistung der humusmehrenden Fruchtarten minus  
Humusreproduktionsbedarf der humuszehrenden Fruchtarten

Details dazu sind im Standpunkt "Humusbilanzierung" des VDLUFA (2014) angeführt.

Die Boden.Wasser.Schutz.Beratung (BWSB) der LK OÖ hat bereits auf Basis des VDLUFA-Standpunktes ein Humusbilanzierungstool auf Excelbasis entwickelt und dieses mit zahlreichen Praxisbetrieben durchgerechnet. Im Folgenden sind die Ergebnisse von 147 Betrieben mit folgenden Charakteristika dargestellt:

- 4.099,2 ha Ackerfläche,
- 79,6 % der Betriebe mit Zwischenfruchtanbau,
- 25,15 % der Ackerfläche mit Zwischenfruchtanbau und
- 85,7 % der Betriebe setzen organische Dünger ein.

Abbildung 12: Bilanzierungsergebnisse von Beispielbetrieben (Franz Hölzl, Boden.Wasser.Schutz Beratung)



Darüber hinaus wurde im Jahr 2011 mit Gemüsebaubetrieben in der Region ein Beratungsschwerpunkt gesetzt:

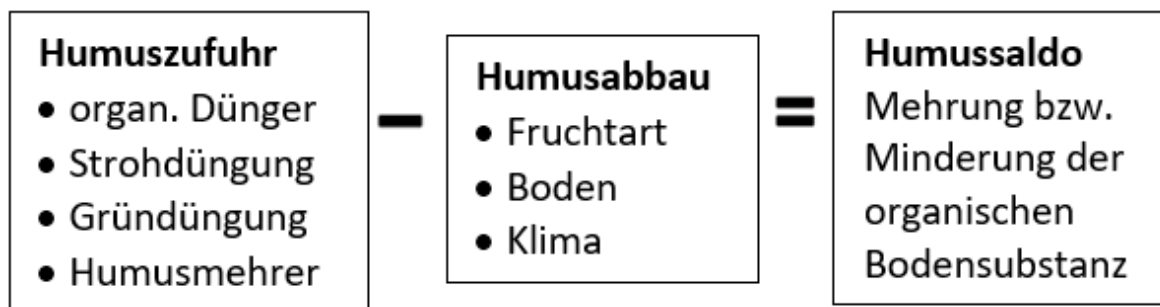
26 Betriebe, insgesamt 810 ha Ackerfläche

- Durchschnittlich 31 ha pro Betrieb
- Durchschnittlich 53,4 % Gemüse (Feld- oder Verarbeitungsgemüse) und Speisekartoffel in der Fruchtfolge
- Auswertung gemäß den Cross Compliance Daten
  - Durchschnitt: - 82 kg C/ha
  - Innerhalb Toleranzbereich: 73 %
- Auswertung nach VDLUFA (obere Werte):
  - Durchschnitt: - 289 kg C/ha
  - Innerhalb Toleranzbereich: 54 %

Kolbe Methode:

Das Prinzip der Humusbilanzierung ist, dass dem Humusabbau, der im Laufe einer Fruchtfolge auftritt, die Humuszufuhr im selben Zeitraum gegenübergestellt wird, wie bei einer Einnahmen-Ausgaben-Rechnung. Für die Humuszufuhr werden Stroh, organische Dünger, Gründüngung und humusmehrnde Kulturen angerechnet.

Abbildung 13: Prinzip der Humusbilanzierung (Eva Erhard, Bioforschung Austria)



Das Ergebnis ist der Humussaldo, der zeigt, ob die vorliegende Bewirtschaftung zu einer Anreicherung oder einem Verlust von Humus führt.

Die standortangepasste Humusbilanzierungsmethode (Kolbe, 2007) zeichnet sich durch eine Differenzierung der Humuskoeffizienten nach Standortfaktoren, die die Humusproduktionsleistung beeinflussen, aus. Dabei wird im Wesentlichen die unterschiedliche Wirkung von Bodenart, Feinanteil, C/N-Verhältnis, Temperatur und Niederschlag auf die Humifizierung berücksichtigt. Je nach Standortgruppe variieren die Humusbedarfskoeffizienten der verschiedenen Fruchtarten, das heißt Humusanreicherung bzw. Humusabbau bei derselben Feldfrucht sind je nach Standortgruppe unterschiedlich hoch.

Die standortangepasste Bilanzierungsmethode erzielt halb- bis vollquantitative Ergebnisse und deutliche bis hohe Korrelationen zwischen den berechneten Humussalden bzw. -gehalten und den Humusgehalten des Bodens ermittelt aus Dauerversuchen. Die Berücksichtigung der Standortunterschiede erlaubt gesicherte Aussagen über die Veränderung der Humusgehalte des Bodens (Kolbe und Zimmer, 2015).

Bio Forschung Austria bietet in Zusammenarbeit mit dem LFI NÖ Humusbilanzseminare an, bei denen Landwirt die Berechnung von Humusbilanzen für den eigenen Betrieb mit der

Landwirt:innen standortangepassten Humusbilanzmethode erlernen können. Bisher nahmen rund 1.100 Betriebe an den Seminaren teil.

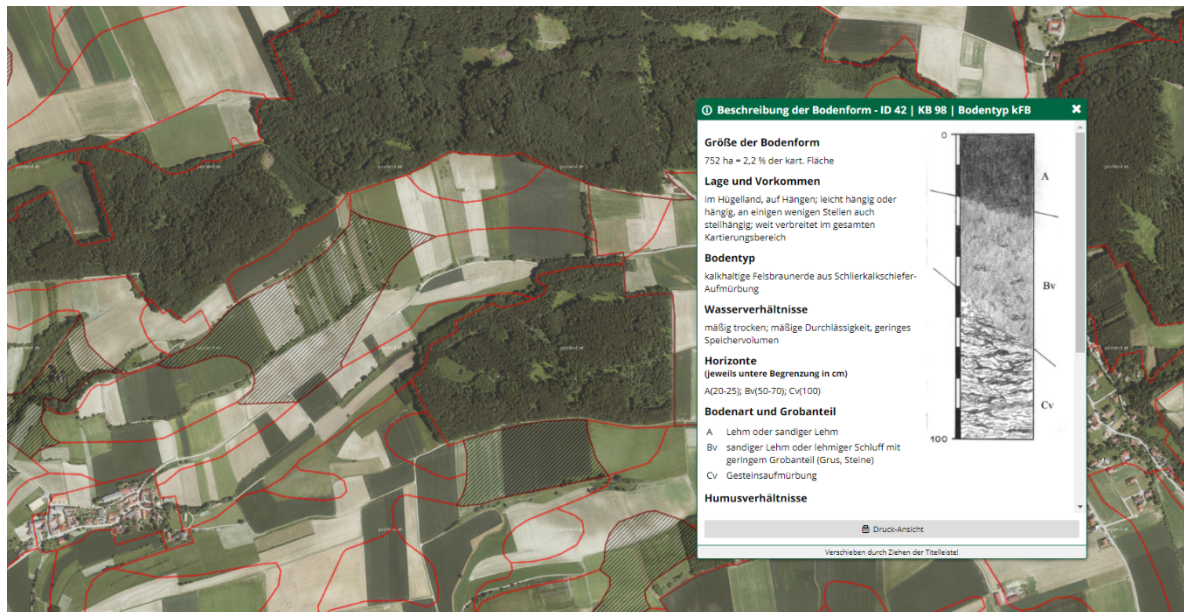
Für die Erstellung von Humusbilanzierungen gibt es verschiedene Methoden; auf Empfehlung der Bio Forschung Austria verwendet z. B. die NÖ Agrarbezirksbehörde bei ihren Berechnungen die standortangepasste Humusbilanzierungsmethode (STAND) nach Kolbe (2007). Bei dieser Methode werden sechs unterschiedliche „Standortgruppen“ berücksichtigt. Je nach Bodenart, Bodentyp und Feinanteil wird der ausgewählte Standort einer solchen Standortgruppe zugeteilt. Dadurch wird ersichtlich, ob es sich um einen leichten, mittelschweren oder schweren Boden handelt. Die Standortgruppen geben an, wie stark der Humusabbau bzw. die Humuszehrung einer Feldfrucht ist, aber auch, wie stark der Humusaufbau durch organische Düngung oder das Belassen der Ernterückstände ist. Die dafür benötigten Bodendaten werden vorab mit Hilfe der elektronischen Bodenkarte eBOD ([www.bodenkarte.at](http://www.bodenkarte.at)) abgefragt.

Für die Humusbilanzierung mit der standortangepassten Methode nach Kolbe werden demnach folgenden Daten benötigt:

- Fruchtfolge,
- Erträge,
- Strohmenge,
- Zufuhr von organischen Düngern,
- Bodendaten (aus der eBOD),
- Jahresdurchschnittstemperatur und
- Jahresniederschlag.

Die NÖ Agrarbezirksbehörde hat in den vergangenen Jahren für die Ackerflächen von rund 280 landwirtschaftlichen Betrieben standortangepasste Humusbilanzierungen erstellt und diese als Grundlage benutzt, um für jedes einzelne Feldstück Optimierungen in der Bewirtschaftung vorzuschlagen. Diese Optimierungen betreffen sowohl die Fruchtfolge, als auch das Düngemanagement sowie die Einarbeitung von Ernterückständen und den Anbau von Zwischenfrüchten. Um die konkreten Maßnahmen optimal anwenden zu können, ist es wichtig zu wissen, welche Bodenart auf dem jeweiligen Feldstück gegeben ist. In der elektronischen Bodenkarte ([www.bodenkarte.at](http://www.bodenkarte.at)) können die einzelnen Bodenarten abgefragt werden. In der elektronischen Bodenkarte ist ein einzelner Layer für die Standortgruppen verfügbar.

Abbildung 14: Bodenkarte: [www.bodenkarte.at](http://www.bodenkarte.at)



## Zusammenfassung

Die Methode der Humusbilanzierung ist ein einfaches Instrument, das Informationen über die Versorgung von Ackerböden mit organischer Substanz liefert. Ziel der Methode ist die Sicherstellung der anforderungsgerechten Versorgung von Ackerböden mit organischer Substanz. Die Methode hält deutlich fest, dass eine exakte Prognose auf Veränderungen der Humusgehalte oder -vorräte nicht möglich ist. Grundlagen für die Kennwerte sind Ergebnisse langjähriger Feldversuche, Untersuchungen unter Laborbedingungen als auch Quantifizierungen auf der Grundlage von Analogieschlüssen (VDLUFA, 2014).

Die Humusbilanzierung ist ein maßnahmenbasiertes Instrument und die Ergebnisse können nicht mit Ergebnissen aus Versuchen, die  $C_{org}$ -Änderungen im Boden analytisch erfassen, verglichen werden.

Dies wird in der VDLUFA Humusbilanzierungsmethode auch damit unterstrichen, dass die Kennwerte mit der dimensionslosen Einheit Humusäquivalente bezeichnet werden.

„Dies soll verdeutlichen, dass die Kennwerte dazu dienen sollen, die optimale Versorgung mit organischer Substanz zu bemessen und nicht dazu geeignet sind, die Veränderung der Bodenhumusvorräte zu errechnen (VDLUFA, 2014).“

### 3.3. Monitoring auf EU-Ebene

Die LUCAS-Erhebung (Land use and land cover survey, JRC 2018) ist eine harmonisierte Erfassung von Daten zur Landnutzung und Landbedeckung sowie von Bodeneigenschaften innerhalb der Europäischen Union. Die Daten werden seit 2001, für Boden seit 2011 in regelmäßigen Abständen erhoben, für Bodeneigenschaften stehen bereits 3 Datensätze zur Verfügung.

Im nationalen Projekt LUCASSA ([www.dafne.at](http://www.dafne.at)) wurden die Ergebnisse mit nationalen Untersuchungen verglichen und die Eignung des Datensatzes als Basis auch für ein nationales Monitoring geprüft. Dabei zeigte sich, dass aufgrund der Streuung der Ergebnisse innerhalb eines LUCAS-Standortes die Eignung eines Punktes für ein Monitoring vorab im Detail abgeklärt werden und auf eine präzise Probenahme geachtet werden muss. Die Varianz innerhalb des LUCAS – Beprobungsbereichs war mit einzelnen Ausnahmen für ausgewählte Parameter relativ gering. In Bezug auf die Repräsentativität des Standortes für einen Umkreis von lediglich 100m muss in Einzelfällen aber auch mit deutlichen Abweichungen gerechnet werden. Die Spannweiten und Abweichungen der Mittelwerte der Untersuchungsergebnisse der acht Standorte zur Untersuchung der Flächenrepräsentativität zeigen deutlich, dass die Böden Österreichs eine große Heterogenität aufweisen und dass gebietsweise bereits innerhalb einer Fläche von 4 km<sup>2</sup> die Bandbreite der chemischen Bodenparameter derart groß ist, dass sie durch einen einzigen Punkt für ein größeres Gebiet nur unzureichend beschrieben werden kann. Eine Extrapolation der LUCAS-Ergebnisse in die Fläche erscheint daher nicht zulässig.

Das LUCAS-Bodenmonitoring ist ein wertvolles und aufschlussreiches System zur Erfassung wesentlicher Bodeneigenschaften, das zusätzlich den Vorteil einer bereits relativ langen Zeitreihe bietet und das voraussichtlich auch in den kommenden Jahren weiter durchgeführt werden wird. Allerdings sind die Schwachstellen des Systems, wie z. B. das fixe Probepunkteraster oder mögliche Standortabweichungen bei den Probenahmen zu beachten. Eine Verwendung für ein nationales Bodenmonitoring erscheint dann möglich, wenn eine ausreichende Dokumentation und Qualitätssicherung der Probenahme gegeben ist, eine genaue Evaluierung der Standorte hinsichtlich der Repräsentativität des Probenahmepunktes und damit einer Verwendbarkeit für Modellierungen oder Extrapolationen erfolgt und eine gewisse Flexibilität des Probenahmepunktes zur Steigerung der Aussagekraft der Ergebnisse möglich ist. Grundsätzlich muss aber angemerkt werden, dass Einschränkungen vor allem hinsichtlich der Aussagekraft einzelner Punkte für ein größeres Gebiet gelten.



# 4 Handlungsoptionen für die Umsetzung von humussteigernden – bzw. erhaltenden Maßnahmen in die Praxis

## 4.1 Förderung durch die öffentliche Hand

### 4.1.1 Flächenbezogene Förderung

Eine flächenbezogene Förderung erfolgt in Österreich im Wesentlichen durch das Österreichische Programm zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft (ÖPUL).

Das Agrarumweltprogramm ÖPUL wird in Österreich bereits seit dem EU-Beitritt Österreichs 1995 angeboten. Die Verpflichtungszeiträume für die angebotenen Agrarumweltmaßnahmen betrugen mindestens 5, und maximal 7 Jahre, wobei es auch zwischen den Programmplanungsperioden eine entsprechende Kontinuität der angebotenen Maßnahmen gab. Besonders der Aufbau von Humus im Boden bedarf vieler Jahre, bis deutliche Steigerungen festgestellt werden können. Gerade die Begrünungsmaßnahmen im ÖPUL, der Beitrag der biologischen Landwirtschaft sowie die Anwendung von Mulch- und Direktsaat ergaben in der Evaluierung der Programme deutliche Steigerungen des Humusgehaltes in Österreichs Ackerböden in den Jahren, seitdem sie angeboten werden.

In Wien wurde für Betriebe mit Flächen im Grundwasserschutzgebiet das Pilotprojekt „Humusaufbau und Erosionsschutz“ angeboten. Dabei darf während des gesamten Verpflichtungszeitraums auf Ackerflächen keine wendende Bodenbearbeitung durchgeführt werden. Ziele der ergänzenden Maßnahme sind in erster Linie

- Förderung des Humusaufbaus und der Kohlenstoff-Sequestrierung,
- Förderung der Entwicklung der Bodenlebewesen und deren Lebensraums,
- Verringerung der Wind- und Wassererosion und

- Verringerung der Wasserverdunstung.

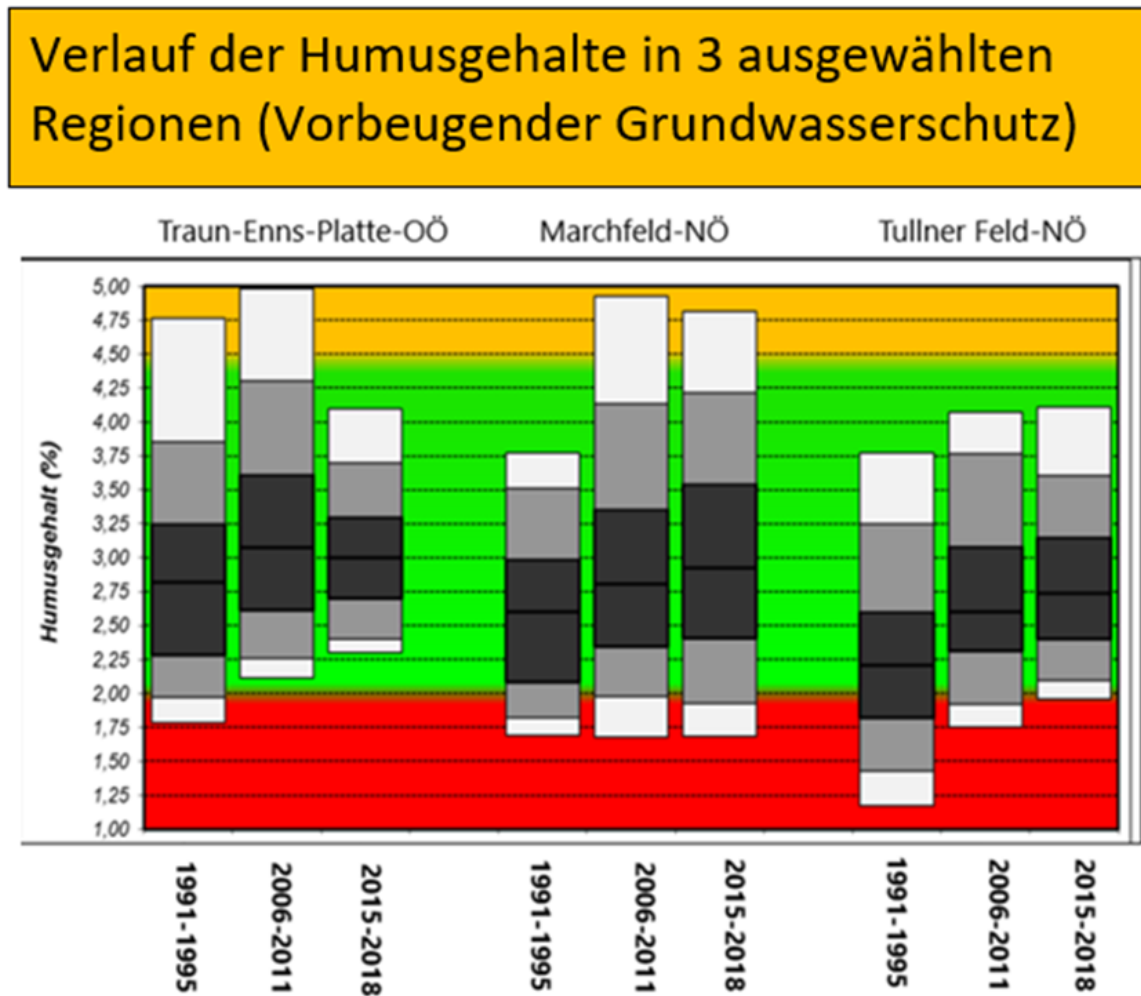
In einem wissenschaftlichen Begleitprojekt wurden die Effekte der Maßnahme durch Bodenanalysen, die alle zwei Jahre auf GPS – verorteten Probenahmepunkten durchgeführt werden, überprüft. Dabei zeigte sich zunächst vor allem eine Veränderung der Humusqualität hin zu stabileren Humusformen.

Zur kontinuierlichen Ermittlung der Humusgehalte wurde die Entnahme von Bodenproben im Rahmen der ÖPUL-Maßnahme „Vorbeugender Grundwasserschutz“ vorgeschrieben. Basierend auf den Auswertungen hierzu weisen die Humusgehalte in jeder Region eine große Bandbreite auf, die auch auf den unterschiedlichen Standorteigenschaften wie Grundwassereinfluss und Bodenart (leichte sandige Böden mit niedrigen Humusgehalten bis hin zu schluffig-tonigen Lehmen) beruhen. Für die Ermittlung eines Trends hinsichtlich Entwicklung der Humusgehalte in den österreichischen Ackerböden sind der Median bzw. die Häufungswerte, in deren Bereich sich die meisten Daten befinden, aussagekräftig (siehe Abbildung 15). In den ersten 10 bis 15 Jahren nach Einführung des Agrarumweltprogramms ÖPUL waren deutliche Zunahmen der Humusgehalte ersichtlich, in den letzten 8-10 Jahren konnten die Gehalte auf dem höheren Niveau in OÖ (Traun-Enns-Platte) stabil gehalten und im Tullner Feld und Marchfeld sogar noch weiter erhöht werden.

Die Messergebnisse zeigen deutlich einen wesentlichen Anstieg der Humusgehalte seit den 90er Jahren sowie eine Stabilisierung auf höherem Niveau in den letzten zehn Jahren. Der optimale Humusgehalt ist gebietsweise standortbezogen bereits erreicht oder wird in wenigen Fällen überschritten (gelber Bereich).

Zu Abbildung 15: Innerhalb des dunkelgrauen Bereiches liegen 50 % der Werte (Median ist die schwarze Linie), im hellgrauen Bereich sind die jeweils weiteren 15 % niedrigeren und höheren Werte (innerhalb des hell- und dunkelgrauen Bereichs somit 80 % der Werte). Die Probenzahlen in den Regionen sind von ÖPUL-Verpflichtungen und anderen Bewirtschaftungsfaktoren abhängig und daher sehr uneinheitlich.

Abbildung 15: Verlauf der Humusgehalte in 3 ausgewählten Regionen (Dersch, 2019)



### Beratung/Bildung

Verschiedene Institutionen in Österreich bieten laufend Beratungen zum Thema Humuserhalt bzw. Humusaufbau an. Dabei wird oftmals sowohl mit landwirtschaftlichen Betrieben als Best-Practice-Beispiele als auch mit den landwirtschaftlichen Fachschulen zusammengearbeitet.

Tabelle 3: Übersicht über Beratungsthemen und durchführende Institutionen

| Beratungen zum Thema Humus                                                                                                                                                                  | Institutionen                                                                                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Laufende Beratungen zum Thema Bodenfruchtbarkeit, Optimierung des Nährstoffmanagements, Boden- und Pflanzenernährung (Korrelation mit dem Humus)                                            | LK Bgld., BWSB + LK OÖ, LK Stmk, LK Ktn., LK NÖ, LAKO, Verein Boden.Leben; Bio Forschung Austria; BIO AUSTRIA                                                                              |
| Bodenabtrags- und Erosionsschutzberatungen inkl. Kooperationsprojekte zwischen Landwirtschaft und Gemeinden                                                                                 | LK Bgld., BWSB + LK OÖ, LK Stmk, LK Ktn., LK NÖ, LAKO, Verein Boden.Leben; BIO AUSTRIA                                                                                                     |
| Fruchtfolgeberatungen                                                                                                                                                                       | LK Bgld., BWSB + LK OÖ, LK Stmk, LK Ktn., LK NÖ, LAKO, Verein Boden.Leben; Bio Forschung Austria; BIO AUSTRIA                                                                              |
| Begrünungen und Zwischenfruchtbau – Versuche auf zahlreichen Praxisbetrieben – Feldbegehungen                                                                                               | LK Bgld., BWSB LK OÖ – Arbeitskreise Ackerbau und Arbeitskreise Boden.Wasser.Schutz, LK Stmk, LK Ktn., LK NÖ, LAKO, Verein Boden.Leben, HUMUS Bewegung; Bio Forschung Austria; BIO AUSTRIA |
| Mähdruschsaaten, Maisbegleitsaaten, Dammkultur, Streifenfrässaaten                                                                                                                          | LK Bgld., LK NÖ, BWSB – LK OÖ; LK Stmk.; BIO AUSTRIA                                                                                                                                       |
| Mulch- und Direktsaaten                                                                                                                                                                     | LK Bgld., BWSB – LK OÖ; LK Stmk., LK Ktn., LK NÖ, LAKO, Verein Boden.Leben; BIO AUSTRIA                                                                                                    |
| Humusbilanzierung (inkl. Maßnahmenberatung)                                                                                                                                                 | NÖ ABB, FIBL, BWSB LKOÖ, Bio Forschung Austria                                                                                                                                             |
| Humus+Beratung: zu den Themen: „Minimalbodenbearbeitung“, „Regenerative Landwirtschaft“, „Unter- Zwischensaaten und Winterbegrünung“, „Regenerativer Gemüsebau“, „Agroforst“, „Mob Grazing“ | Humus+ Modell Ökoregion Kaindorf                                                                                                                                                           |
| Humus+Akademie – Tagesworkshops                                                                                                                                                             | Humus+ Modell Ökoregion Kaindorf                                                                                                                                                           |
| Humus+Stammtische                                                                                                                                                                           | Humus+ Modell Ökoregion Kaindorf, HUMUS Bewegung                                                                                                                                           |
| Humus+Tage – jährlich stattfindendes internationales Symposium                                                                                                                              | Humus+ Modell Ökoregion Kaindorf                                                                                                                                                           |
| Zertifikatslehrgang Bodenpraktiker                                                                                                                                                          | Bio Forschung Austria; BIO AUSTRIA                                                                                                                                                         |

(eigene Darstellung)

Als neues „Tool“ zur Bestimmung der Bodentypen und Ableitung der jeweiligen Eigenschaften wurde der „Bodenfächer“ sowohl für Acker- als auch Grünlandstandorte entwickelt (<https://www.ages.at/umwelt/boden/wissen-und-bildung>)

Diese Aufzählung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

All diese Ergebnisse und Erkenntnisse werden mittels vielfältiger Methoden den Bäuerinnen und Bauern vermittelt: Fachartikel in den Zeitungen der Landwirtschaftskammern, Publikationen im Internet, (lk-online: [www.lko.at](http://www.lko.at); [www.bwsb.at](http://www.bwsb.at), [www.bodenistleben.at](http://www.bodenistleben.at); [www.humusbewegung.at](http://www.humusbewegung.at); [www.bioforschung.at](http://www.bioforschung.at), [www.lako.at](http://www.lako.at), [www.myhumus.at](http://www.myhumus.at), [www.humusbauern.at](http://www.humusbauern.at), [www.fibl.org](http://www.fibl.org), [www.bio-austria.at](http://www.bio-austria.at) ...), Workshops, Vorträge, Seminare, Webinare, Podcasts, Videos, Feldtage, Feldbegehungen.

### **Zertifikatslehrgang Bodenpraktiker**

Eine hohe Bodenfruchtbarkeit ist Basis für einen langfristigen Betriebserfolg in der Landwirtschaft. Der Zertifikatslehrgang Bodenpraktiker weckt die Begeisterung für das Ökosystem Boden und vermittelt Bäuerinnen, Bauern und Personen in landwirtschaftlichen Nahebereichen fundiertes Wissen zum Thema Boden und Bodenfruchtbarkeit. Er qualifiziert die Teilnehmer:innen, als bäuerliche AnsprechpartnerInnen für Bodenfragen tätig zu sein.

Der Bodenpraktiker-Kurs bringt eine intensive und praxisorientierte Auseinandersetzung mit dem Ökosystem Boden. Die Teilnehmer:innen lernen den Boden zu beobachten, mittels Spatenprobe, Krümeltest, Fingerprobe, Nitrattest etc. zu beurteilen und zu interpretieren (Abbildung 16).

Der 80 h Lehrgang gibt den TeilnehmerInnen Anregungen für die Optimierung der Bodenbewirtschaftung und Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit am eigenen Betrieb und vermittelt das Handwerkzeug für die Weitergabe von Wissen und Erfahrung an Berufskolleg:innen und Interessierte.

Kursinhalte sind der Boden als Lebensträger der Erde, Bodenaufbau und Bodenbildungsprozesse, Boden und Pflanze, ökosystemare Bodenansprache, Bodenbearbeitung (Ackerbau), Grünlandmanagement und Bestandesführung (Grünland), Düngung und Wirtschaftsdüngeraufbereitung, Persönlichkeitsbildung und Präsentationstechnik. Jede/r Teilnehmer:in verfasst eine Abschlussarbeit. Sie soll die Kursinhalte der Ausbildung mit einer Fragestellung der Bodenbewirtschaftung aus dem eigenen Betrieb verbinden.

Der Bodenpraktiker wurde 2005 auf Initiative von Dr. Wilfried Hartl (Bio Forschung Austria) gemeinsam von Bio Forschung Austria, dem Distelverein und BIO AUSTRIA entwickelt.

Derzeit wird der Zertifikatslehrgang Bodenpraktiker mit den Schwerpunkten Ackerbau, Grünland und Gemüsebau von BIO AUSTRIA [www.bio-austria.at](http://www.bio-austria.at), Bio Forschung Austria [www.bioforschung.at](http://www.bioforschung.at), in Zusammenarbeit mit dem LFI ([www.lfi.at](http://www.lfi.at)) angeboten.

Abbildung 16: Bestimmung der Bodenart (Foto: Thomas Rupp)



#### 4.1.2 Beispiele für aktuelle Projekte

Ausgangspunkt vieler aktueller Projekte war die von Frankreich im Rahmen der 21. Weltklimakonferenz in Paris im Jahr 2015 initiierten „4 Promille Initiative“. Damit sollte das Bewusstsein um die Bedeutung des Bodenkohlenstoffs für den Klimaschutz gestärkt werden. Um das Potenzial des Bodens plakativ darstellen zu können, wurde errechnet, dass eine jährliche zusätzliche Kohlenstoffspeicherung um die namensgebenden 4 Promille sämtliche anderen Emissionen kompensieren könnte. In der Folge haben sich zahlreiche Studien mit der konkreten Erreichbarkeit dieses Zieles auseinandergesetzt (z. B. van Groenigen et al, 2017; Riggers et al., 2021; Bruni et al., 2021). Dabei wurde vielfach bestätigt, dass dies in dieser Form nicht realistisch ist.

**EJP (European Joint Programme) Soil:** Towards climate-smart sustainable management of agricultural soils (2020-2024), HORIZON 2020. Partner: BIOS (BOKU, AGES, BFW, UBA, BAW-IKT-Petzenkirchen).

Ziel des EJP SOIL ist, Wissen und Instrumente für eine klimafreundliche landwirtschaftliche Bodenbewirtschaftung zu entwickeln. Dafür arbeiten 26 Partnerorganisationen aus 24 Ländern eng zusammen, um abgestimmte und leicht zugängliche Bodeninformationen Landwirt:innen, Landbesitzer:innen, Landverwalter:innen und Industrie zur Verfügung zu stellen, wobei auf regionale Unterschiede, unterschiedliche landwirtschaftliche Praktiken und unterschiedliche Bodentypen eingegangen wird. Im Fokus steht die praktische Umsetzung von klimafreundlicher Bodenbewirtschaftung, bei der organische Kohlenstoffspeicherung (Humus) und Treibhausgasminderung Berücksichtigung finden.

**CarboSeq: SOC sequestration Potenzial of agricultural soils in Europe**, internes EJP Soil Projekt (2021-2025), HORIZON 2020. Partner: BIOS (BOKU, AGES, BFW, UBA, BAW-IKT-Petzenkirchen).

Ziel des Projektes ist eine verbesserte räumlich genau definierte Bestimmung des Potenzials landwirtschaftlicher Böden mehr Kohlenstoff zu binden. Dabei sollen verschiedene Anbaumethoden, Bodenbewirtschaftungssysteme und Szenarien der Landnutzungsänderung (z. B. Grünland - Ackerland) unter verschiedenen bodenklimatischen Bedingungen auf regionaler und nationaler Ebene berücksichtigt werden. Die dadurch entstehenden Kosten sollen abgeschätzt werden und die Auswirkungen dieser Optionen auf die Treibhausgasemissionen analysiert werden.

Das SOC-Sequestrierungspotenzial der europäischen agro-pedoklimatischen Regionen soll ermittelt werden.

**MaxRoot-C: Optimizing roots for sustainable crop production in Europe – pure cultures and cover crops**, internes EJP Soil Projekt (2021-2025), HORIZON 2020. Partner: BIOS (BOKU, AGES, BFW)

Das Ziel von MaxRoot-C ist es, landwirtschaftliche Maßnahmen zur Erhöhung des Kohlenstoffeintrags durch die Wurzeln in den Ober- und Unterboden und damit der SOC-Vorräte durch die Auswahl von Hauptfruchtarten und Zwischenfrüchten in den gängigsten europäischen Anbausystemen zu bewerten. Diese Optionen sollen mit besonderem Fokus auf Co-Benefits für die Anpassung an den Klimawandel durch verbesserte unterirdische Nährstoff-

und Wasseraufnahme und Nachteile durch Verschiebungen in der Biomasse von ober- zu unterirdisch Vorkommen und mögliche Ertragsminderungen untersucht werden. Bislang ist die Einbeziehung von unterirdischen Pflanzeigenschaften in Sortenprüfungen und Züchtungsprogrammen äußerst begrenzt, mit dem Projekt soll mehr Wissen darüber generiert werden.

**EOM4Soil: Exogenous organic matter for climate mitigation and improved soil health**, internes EJP Soil Projekt (2021-2025), HORIZON 2020. Partner: BIOS (BOKU, AGES)

Die Förderung des Recyclings von organischen Reststoffen/Abfällen zu Düngemitteln (z. B. Kompost oder Biokohle) und die Förderung kürzerer Wertschöpfungsketten und der Kreislaufwirtschaft zur Verbesserung der Bodengesundheit ist eine Priorität in der EU-Agenda (Farm to Fork Strategy, Green Deal, Mission Board for Soil Health and Food, Horizon Europe). Ziel des Projektes ist es, Wissen über die Nutzung, Verarbeitung und Anwendung von externen Quellen organischer Substanz zu gewinnen, um den Klimawandel abzuschwächen und gleichzeitig eine nachhaltige Produktion zu erhalten und die Bodengesundheit zu verbessern. Kompost und Biokohle werden als organische Düngemittel Europa weit diskutiert. Das Projekt wird zu mehr Wissen bezüglich Kohlenstoffspeicherung im Boden und gleichzeitiger Emission von Treibhausgasen durch diese Düngemittel führen.

**ProbeField: Innovative techniques to monitor SOC stocks and soil degradation/restoration changes in the EU, using spectral systems/NIRS/MIRS, and other proximal sensing tools**, internes EJP Soil Projekt (2021-2025), HORIZON 2020. Partner: BIOS (BOKU, AGES)

Es werden sehr viel schnellere und durchsatzstarke Methoden der Bodencharakterisierung benötigt, um den Anforderungen der Bodenpolitik gerecht zu werden, wie z. B. die Bewertung von Veränderungen des Bodenzustands, des SOC und der Erosionsraten unter landwirtschaftlicher Bewirtschaftung im Rahmen der CAP oder die Bewertung des Nährstoffzustands des Bodens im Zusammenhang mit den Zielen der Farm-to-Fork-Strategie. Die Bodenspektroskopie (NIRS, MIRS) wurde in den letzten Jahren entwickelt und verschiedene proximale Sensing-Techniken bieten vielversprechende Technologien, um die Bodenvermessung zu beschleunigen und die Kosten zu reduzieren. Das Projekt konzentriert sich auf den Einsatz von Proximalsensorik für die Bodenüberwachung im Feld und zielt darauf ab, Proximalsensorik-Techniken für die Schätzung von Bodeneigenschaften zu validieren.

**SERENA: Soil Ecosystem Services and soil threats modelling and mapping**, internes EJP Soil Projekt (2021-2025), HORIZON 2020. Partner: BIOS (BAW, BOKU, AGES, BFW)



Im Projekt sollen verschiedene Bedrohungen für den Boden und die Bodenfunktionen - von der Produktionsfunktion über qualitative Bodenfunktionen bis hin zum Humusverlust - definiert und zusammengefasst werden. Innovative Bewertungswerkzeuge sollen für die Landplanung und die Bodenpolitik verwendet werden. Nach der Abstimmung von forschungsbasierten Definitionen von Bodenbedrohungen, Ökosystemleistungen und relevanten Indikatoren und Bodeneigenschaften wird sich das Projekt auf die gemeinsame Bewertung von bodenbasierten Ökosystemleistungen und Bodenbedrohungen auf Skalen von lokal bis regional, von national bis europäisch konzentrieren. Das Projekt wird Konzepte, Ergebnisse und Proben aus früheren Projekten und Langzeitexperimenten verwenden, um einen umfassenden Überblick über Bedrohungen für den Boden und wichtige Bodenfunktionen zu geben.

**Road4Schemes: Roadmap for Carbon Farming Schemes**, internes EJP Soil Projekt (2021-2025), HORIZON 2020. Partner: BIOS (BOKU, AGES, BFW)

Carbon Farming hat nach dem Pariser Abkommen und dem "Green Deal" als Option zur Verringerung des Kohlenstoffausstoßes an Bedeutung gewonnen. Es muss jedoch die Forschung in die Gestaltung und Umsetzung der Politik einbezogen werden, um einen gegenseitigen Nutzen für Landnutzer:innen, Böden und die Gesellschaft sicherzustellen. In diesem Sinne wird Road4Schemes eine Bewertung der Stärken und Schwächen der derzeitigen ergebnisbasierten Regelungen für Carbon Farming und zusätzliche Zahlungen für Ökosystemleistungen (ESS), einschließlich der Optionen für Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung vornehmen. Zweitens sollen die Wahrnehmungen der Interessengruppen in Bezug auf verschiedene Strategien für die Ausgestaltung von Systemen und politische Einflussfaktoren bewertet werden. Drittens soll ein Fahrplan für die Entwicklung und Umsetzung ergebnisorientierter Systeme für die Carbon Farming und zusätzliche Zahlungen für Ökosystemleistungen aufgestellt werden, der die festgestellten Hindernisse beseitigt. Das Projekt wird eine Bestandsaufnahme der Stärken und Schwächen bestehender Optionen für die Gestaltung von Systemen, eine Bewertung der politischen Einflussfaktoren und der Wahrnehmung der Gestaltungsoptionen durch die Interessengruppen, lokal angepasste Szenarien für die Einführung von Systemen sowie einen Fahrplan für die Förderung ergebnisbasierter Systeme für Carbon Farming und Zahlungen für zusätzliche ökosystemare Dienstleistungen liefern.

**CASAS (CArbon Sequestration in Austrian Soils)**, 2019-2022, ACRP11 – 2019. Partner: AGES, BFW, HBLFA Raumberg-Gumpenstein, WIFO, UBA, BOKU.

Zur Reduzierung der atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Konzentration wird die Erhöhung der organischen Kohlenstoffvorräte im Boden als vielversprechende Maßnahme angesehen. Auf der COP 21 (Paris 2015) wurde die 4-Promille-Initiative gestartet, bei der theoretisch kalkuliert wurde, dass durch eine theoretische jährliche Erhöhung des organischen Kohlenstoffs im Boden jährlich um 0,4 % alle anderen Emissionen kompensiert werden könnten. Um zu beurteilen, ob die Land- und Bodenbewirtschaftung tatsächlich die gewünschte Wirkung auf den Boden hat, überprüfen wir eine Reihe von abgeschlossenen und laufenden Feldversuchen. Es soll auch evaluiert werden, ob die Boden- und Landnutzung nachhaltig, und nicht nur vorübergehend, den organischen Kohlenstoffpool des Bodens erhöhen kann.

**Projekt ASOCseq (Karte des Potenzials österreichischer Böden zur Sequestrierung von organischem Kohlenstoff) - <https://dafne.at/projekte/asocseq>**

Die FAO (UN Food and Agriculture Organization) begann im Frühjahr 2021 an einer Karte zur weltweiten Darstellung des SOC-Sequestrierungspotentials der Böden zu arbeiten. Dabei wurde ein bottom-up Ansatz verfolgt, wonach die UN-Mitgliedstaaten von ihrem jeweiligen Staatsgebiet eine SOCseq-Karte erstellten und schließlich diese nationalen Teilkarten zu einer globalen Gesamtkarte zusammengeführt werden sollten. Um eine einheitliche Vorgehensweise und damit eine Kohärenz der Ergebnisse erreichen zu können, wurden die Methoden und Werkzeuge vorgegeben bzw. zur Verfügung gestellt. Allerdings sollte im gegenständlichen Projekt eine Verbesserung der nationalen Karte erzielt werden, indem nationale, präzisere Grundlagendaten verwendet wurden. Die zu erarbeitende österreichweite Karte (ASOCseq) soll schließlich ein Teil der globalen Karte (GSOCseq) werden.

Für die Erstellung der geplanten Karte, welche vorwiegend unter Verwendung der EDV-Software „R“ erfolgte, wurden von der FAO grundsätzlich sämtliche Kommandos (Scripts) zur Verfügung gestellt. Damit sollte eine einheitliche Vorgehensweise bei der Entwicklung der nationalen Karten gewährleistet werden. Für die Einbindung von Österreich-spezifischen Grundlagendaten war eine Anpassung dieser Scripts in unterschiedlicher Ausführlichkeit notwendig. Es erfolgten Berechnungen auf der Basis der von der FAO standardmäßig zur Verfügung gestellten Daten (Equilibrium Ansatz – FAO; FAO analytischer Ansatz – FAO AA; Österreichische Daten mit analytischem Ansatz – AT AA). Die Berücksichtigung der detaillierten österreichischen Daten führte zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse.

Bei der Modellierung wurden drei Phasen unterschieden: Spin Up-Phase, Warm-Up-Phase und Forward-Phase. Ausgangsbasis der SOC-Vorräte des Bodens für das Modell war die Austrian Soil Organic Carbon (ASOC) Karte, die bereits in der Vergangenheit im gleichnamigen Projekt entwickelt wurde.

Nunmehr liegen die Ergebnisse vor, die dem FAO Manual folgend erzielt wurden und die Voraussetzungen für eine Integration der nationalen Karte (ASOCseq) in die globale (GSOCseq) grundsätzlich erfüllen.

Das Ergebnis der Warm Up-Phase ist der Kohlenstoffvorrat zum Zeitpunkt  $t_0$  des Modells (2018) und dient als Ausgangsbasis für die Berechnung der Prognosen in der Forward-Phase. Die Ergebniskarten zeigen, dass sich, basierend auf den drei unterschiedlichen Berechnungen in Bezug auf die verwendeten Datengrundlagen, 50% der Kohlenstoffvorräte in Österreich zum Zeitpunkt  $t_0$  zwischen 39 und 101 tC/ha bewegen. Dabei ergab sich bei der Verwendung der detaillierten österreichischen Daten (Klimadaten, ASOC – Karte) eine geringere Spanne (39 – 96 tC/ha). Für die Prognosen des Bodenkohlenstoffs im Jahr 2038 bzw. 2040 wurden je Simulationslauf vier Ergebniskarten unter vier unterschiedlichen Szenarien (Business as Usual (BAU) und drei unterschiedliche Managementszenarien – plus 5%, 10% und 20% Kohlenstoffeintrag) erstellt.

Die Ergebniskarten zeigen, dass sich die Kohlenstoffvorräte der landwirtschaftlich genutzten Böden in Österreich größtenteils zwischen 43 und 103 tC/ha im Szenario BAU, zwischen 43 und 104 tC/ha im Szenario „Low“, zwischen 44 und 105 tC/ha im Szenario „Medium“ sowie zwischen 45 und 108 tC/ha im Szenario „High“ bewegen. 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.

Die Auswertung der Ergebnisse auf regionaler Ebene ermöglicht eine grundsätzliche Interpretation des Sequestrierungspotentials basierend auf den bodenkundlichen und klimatischen Gegebenheiten und kann als eine Basis für die Abschätzung der möglichen Wirkung von Maßnahmen herangezogen werden, die den Humusgehalt entweder stabilisieren oder steigern.

Die nationalen Ergebnisse werden für deren Integration in die globale GSOCseq-Karte an die FAO übermittelt.

## Projekt Krümelstar

Das Projekt Krümelstar wird auf Ackerflächen von Landwirt:innen durchgeführt, die im sogenannten „Praktikerforum“ des Kompetenzzentrums für Acker, Humus und Erosionsschutz der LK Steiermark an der praktischen Umsetzung diverser Maßnahmen für klimafitte Ackerböden arbeiten. Diese Landwirt:innen haben jedenfalls mehrjährige praktische Erfahrung zu den Themen Humusaufbau und Erosionsschutz und die im Projekt Krümelstar untersuchten Flächen unterliegen dieser betriebsindividuellen Bewirtschaftung.

Im Projekt werden umfangreiche bodenchemische und –physikalische Untersuchungen auf 100 Böden durchgeführt. Die untersuchten Böden liegen überwiegend in der West- Ost- und Südsteiermark. Im Projekt sind somit auch die unterschiedlichen Bodentypen dieser Region von leichten, sandigen Au- und Braunerdeböden im Murtal, Feistritztal und Sulmtal, über Gleyböden im Raabtal bis hin zu schluffreichen typischen Pseudogleyen in den Hügellagen und Terrassen vertreten.

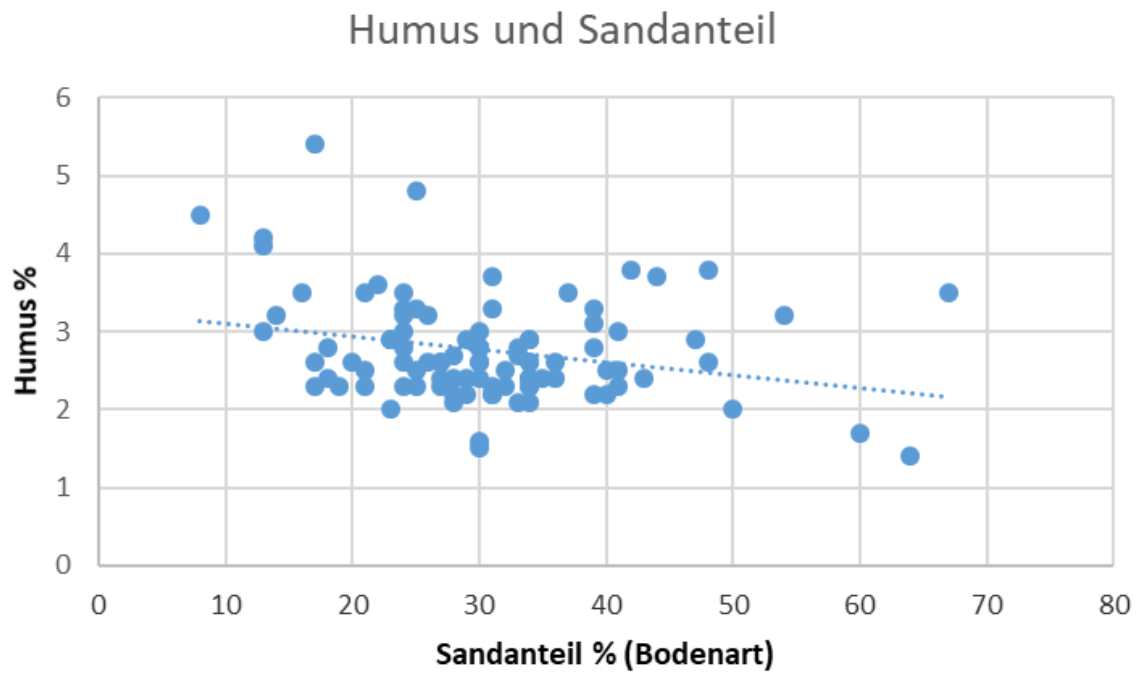
Ziel des Projektes ist es, eventuell vorhandene Probleme und deren Ursachen in den Böden aufzuzeigen, um bodenverbessernde Maßnahmen gezielt einleiten zu können. Außerdem sollen positive Beispielsböden mit hohen Humusgehalten und/oder günstigen Bodenstrukturen gefunden werden um Informationen zur Bewirtschaftung vergleichbarer Ackerböden zu erhalten.

Die bodenchemischen Untersuchungsparameter umfassen unter anderem den Humus, das C/N-Verhältnis, nachlieferbaren Stickstoff, KAK, Spurenelemente und die Bodenart. Die bodenphysikalischen Untersuchungen umfassen Verdichtungsmessungen mit Penetrometer, Lagerungsdichte und Infiltrationsmessung mittels Doppelringinfiltrometer.

Erste Auswertungen zeigen einen mittleren Humusgehalt von 2,8 % (1,4-5,4 %), ein mittleres C/N-Verhältnis von 9,4 (3,7-23,9) und einen mittleren pH-Wert von 6,15 (4,5-6,9).

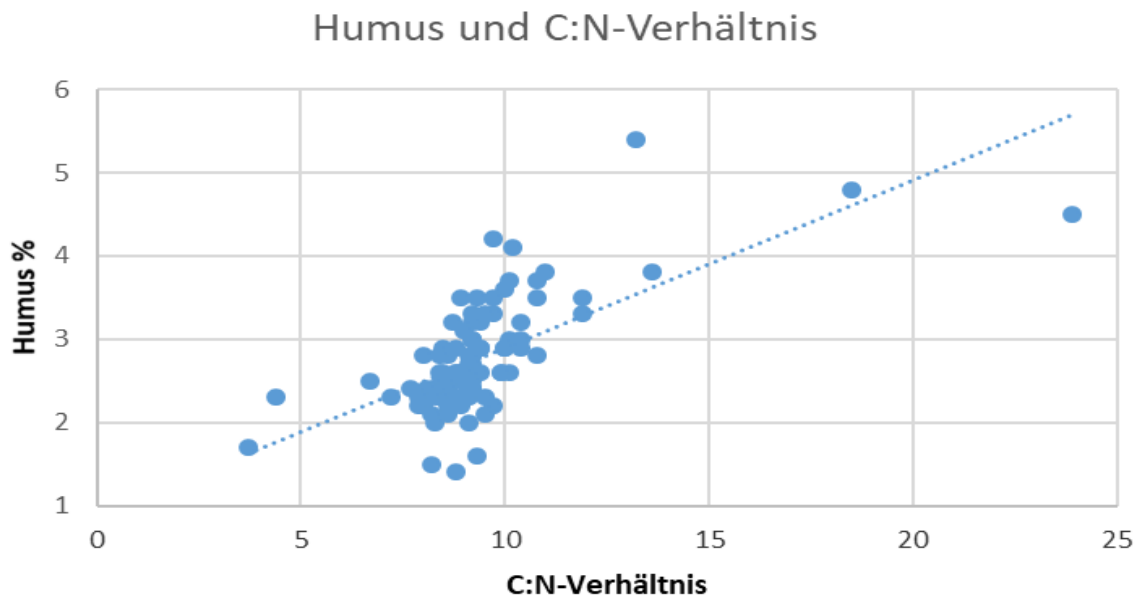
Erwartungsgemäß sinkt mit steigendem Sandanteil im Boden der Humusgehalt. Kein Trend konnte bei diesen 100 Proben hingegen zwischen dem Tongehalt und Humus festgestellt werden.

Abbildung 17: Beziehung zwischen Humusgehalt und Sandanteil (Johannes Maßwohl, LK Steiermark)



Das C/N-Verhältnis im Boden rückt bei der Diskussion bzgl. Humusaufbau immer öfter in den Vordergrund. Auch hinsichtlich Grundwasserschutz ist dieses Verhältnis von Bedeutung. Eine Auswertung der Projektflächen zeigt mit steigendem Humusgehalt einen Trend zu weiteren C/N-Verhältnissen.

Abbildung 18: Beziehung zwischen Humusgehalt und C/N – Verhältnis: die meisten Datenpunkten finden sich im Bereich um 10 (Johannes Maßwohl, LK Steiermark)



## 4.2 Privatinitiativen

### 4.2.1 Beispiele für Vereinsinitiativen

**Verein Bodenleben:** Der „Verein Bodenleben“ ([bodenistleben.at](http://bodenistleben.at)) ist ein Verein für klimaangepasste und aufbauende Landwirtschaft mit den Zielen praxisorientierte Forschungsarbeit, Beratung von Bauern und Bäuerinnen für Bauern und Bäuerinnen und Bewusstseinsbildung.

**Kompost und Biogas Verband Österreich:** Der „Kompost- und Biogas Verband Österreich“ ([www.kompost-biogas.info](http://www.kompost-biogas.info)) steht für die organische Kreislaufwirtschaft, die technologisch möglich, ökologisch notwendig und wirtschaftlich sinnvoll ist. Der Schutz der Böden und des Wassers, die Klimavorsorge und die Bestrebungen in der Politik eine nachhaltige Wirtschafts- und Lebensweise in der Gesellschaft zu verankern, bestimmen das Tätigkeitsfeld des Verbandes. Humusaufbau, Bioenergie und Kohlenstoffbindung sind die Themen unserer Zeit. In diesem Sinne vertritt der Kompost- und Biogasverband Österreich die Interessen Aller und setzt dabei auf Information und Weiterbildung um eine nachhaltige Entwicklung zu fördern.

Österr. Verein für Biomassekarbonisierung: Der „Österreichische Verein für Biomasse-Karbonisierung“ (ÖBIKA; [www.oebika.com](http://www.oebika.com)) ist ein registrierter und an der Universität für Bodenkultur Wien angesiedelter Verein mit dem Ziel, die verschiedenen Formen von Karbonisaten (Pflanzenkohle, sonstige Biokohlen, Hydrokohle, Vergaserkohle) und ihre Anwendungsmöglichkeiten in der Öffentlichkeit bekannt zu machen.

#### **4.2.2 Marketingprogramme (Handel/Produktion)**

Von einigen Handelsbetrieben werden Aktivitäten im Hinblick auf eine humusfördernde Bewirtschaftung gesetzt, auf die in Marketinginitiativen hingewiesen wird. Die Nachvollziehbarkeit der Wirkungen ist nicht in allen Fällen gegeben.

#### **4.2.3 Zertifizierungssysteme**

##### **Zertifizierungssysteme von Bodenkohlenstoff**

Die Messung und Zertifizierung der Kohlenstoffspeicherungen im Boden, welcher in Form von Humus im Boden gebunden wird, hat in den letzten Jahren große mediale Aufmerksamkeit bekommen. Um die gesteckten Klimaziele zu erreichen, hat auch die EU für Ende des Jahres 2021 eine „Mitteilung zu nachhaltigen Kohlenstoffkreisläufen“ vorgelegt (Verweis auf Kapitel 4.3).

Ziel solcher Zertifizierungssysteme ist es, einen Anreiz für Landwirt:innen zu schaffen, um durch eine nachhaltige, regenerative Landwirtschaft verstärkt Kohlenstoff aus der Atmosphäre zu binden und in Form von Humus im Boden zu speichern. Neben der Speicherung von Kohlenstoff, stehen jedoch auch eine Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit, der Wasserspeicherkapazität, Verminderungen der Erosion, des Düngemittel- und Pflanzenschutzbedarfs im Vordergrund.

Landwirt:innen können dadurch eine aktive Rolle im Klimaschutz einnehmen und im Rahmen von erfolgsbasierten Programmen Zertifikate für erfolgreichen Humusaufbau generieren. Die meist privaten Zertifizierungsdienstleister:innen führen für die Landwirt:innen die Beprobung, Analyse und Zertifizierung des gebundenen Kohlenstoffgehalts durch. Hierbei tragen meist die Landwirt:innen die Kosten für Bodenprobe und Analyse und somit auch ein

gewisses Risiko, falls der Humusaufbau nicht erfolgreich ist. Die Zertifizierungsdienstleister:innen vermitteln die generierten Zertifikate größtenteils an Unternehmen aus der Privatwirtschaft, jedoch auch aus der öffentlichen Hand, welche auf freiwilliger Basis ihren CO<sub>2</sub> Ausstoß kompensieren wollen. Die Zertifizierungsdienstleister:innen garantieren den Unternehmen daraufhin die Speicherung des Bodenkohlenstoffs für eine bestimmte Laufzeit.

Dadurch kommt es zu einer Finanzierung einer nachhaltigen, landwirtschaftlichen Praxis aus privatwirtschaftlichen Unternehmen. Der Zertifizierungsdienstleister:innen sorgt mit den Qualitätsstandards seines Programms für die Glaubwürdigkeit bei seinen Zertifikatskäufern und unter den Landwirt/innen.

Die Einhaltung höchster Qualitätsstandards und Richtlinien sind somit für Effektivität und Außenwirkung eines Zertifizierungsprogramms von großer Wichtigkeit. Leider gibt es jedoch (noch) keine einheitlichen und verpflichtenden Qualitätsstandards. Aus diesem Grund sollen zur Bewusstseinsbildung die wichtigsten Kriterien einer qualitativ hochwertigen Zertifizierung in folgendem Abschnitt genauer beleuchtet werden.

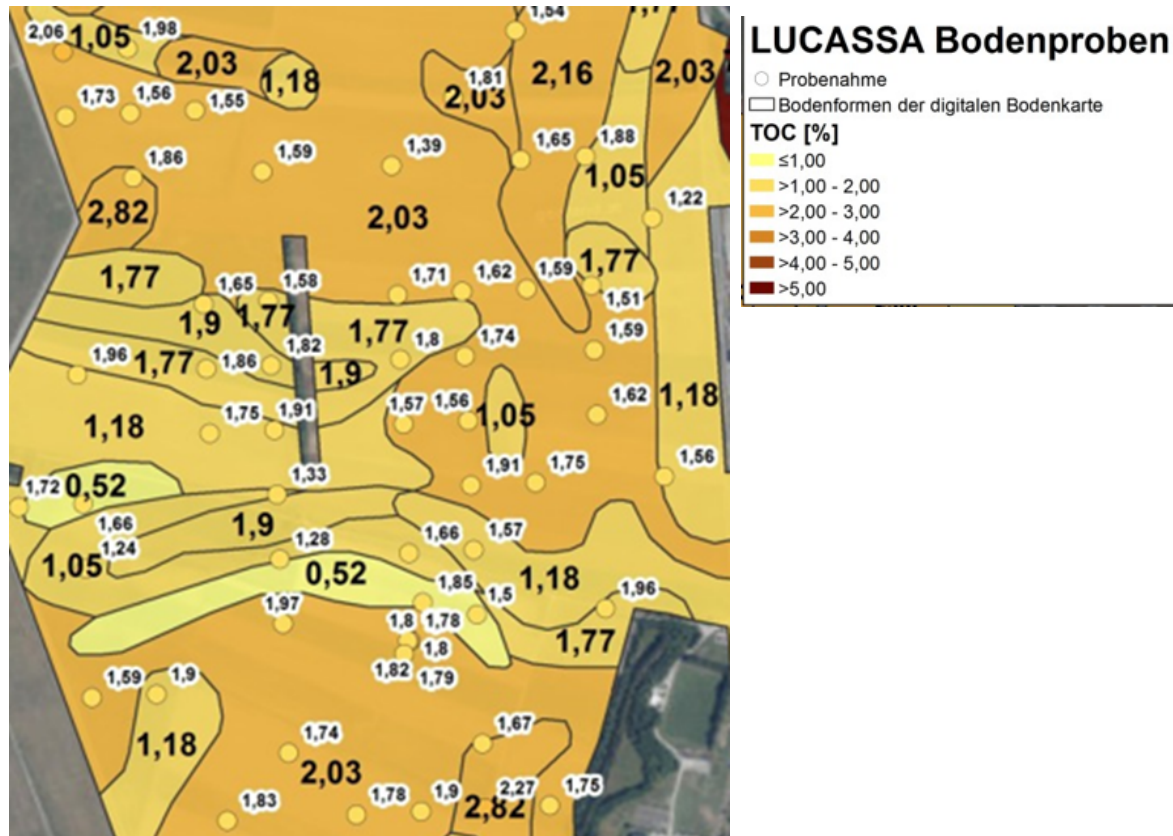
### **Qualitätsstandards bei Zertifizierungssystemen**

#### **Probenahme**

Die Probenahme ist ein entscheidender Faktor für eine Beurteilung allfälliger Veränderungen. Der Humusgehalt kann sowohl aufgrund unterschiedlicher Bodentypen als auch durch anders bedingte kleinräumige Inhomogenitäten stark schwanken. Um diesen Einfluss möglichst zu reduzieren, sind die Probenahmepunkte exakt einzumessen und ein vorgegebenes Probenahmeprotokoll einzuhalten. Folgeuntersuchungen sind zum gleichen jährlichen Zeitpunkt und bei annähernd gleichen Bedingungen (Lagerungsdichte, ev. Bodenbedeckung, Bodenfeuchte) durchzuführen. Um statistisch valide Beurteilungen einer Veränderung des Humusgehaltes sicherzustellen, sollte die Anzahl der Messpunkte möglichst groß sein.



Abbildung 19: Räumliche Inhomogenitäten des Humusgehaltes, Angaben in % gesamter organischer Kohlenstoff (TOC): Fett gedruckt – Gehalte gemäß Bodenform; Weiß hinterlegt: aktuell gemessene Daten (Ausschnitt ca. 1.000 x 1.200 m) (Baumgarten et al., 2021)



## Laboranalyse

Die Analyse des organischen Kohlenstoffs wird gemäß der ÖNORM L 1080 durch Oxidation des Probematerials durchgeführt. Auch hier ist eine gewisse Streuung – abhängig von der Homogenität der Probe und der verwendeten Probenmenge – zu erwarten. Das Ausmaß dieser Varianz wird üblicherweise bei den Analysenergebnissen angeführt.

Für eine Umrechnung des Gehalts an organischem Kohlenstoff (% TOC) oder Humus (% Humus = % TOC x 1,72) auf die Menge an gespeichertem Kohlenstoff, sind auch die Lagerungsdichte und der Steingehalt des Bodens zu messen und in der Berechnung zu berücksichtigen. Dies erhöht zusätzlich die Streuung der Werte.

## **Langfristigkeit des Humusaufbaus**

Bei Zertifizierungssystemen ist ganz klar der zeitliche Horizont festzulegen, da aufgebauter Humus bei falscher Bewirtschaftungsweise auch wieder abgebaut werden kann. Um eine langfristige Veränderung erreichen zu können, werden Verpflichtungszeiträume über 30 Jahre empfohlen (z. B. Gold Standard\* – irreversible C-Sequestrierung auf 30 Jahre: <https://www.umweltbundesamt.de/umwelttipps-fuer-den-alltag/siegelkunde/the-gold-standard>). Dieser zeitliche Horizont ist allerdings für viele Zertifikatsdienstleister nicht praktikabel, da eine Verpflichtung der LandwirtInnen auf einen so langen Zeitraum nur schwer zu erreichen ist.

## **„Verlagerung“ der organischen Substanz und „Leakage“-Effekte**

Wenn der Humusaufbau an einem Standort durch den Verlust von Kohlenstoff an einem anderen Ort (z. B. durch Abfuhr dort produzierter organischer Substanz) erfolgt, bedeutet dies keinen Nettogewinn. Es ist daher eine Definition der Systemgrenze erforderlich. Dies ist auch beim Einsatz von Kompost zu beachten.

Maßnahmen zur Humussteigerung oder Stabilisierung sollten zu einer Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und damit der Produktivität führen. Eine Verringerung der Produktivität durch Maßnahmen zur Kohlenstoff – Sequestrierung könnte zu einer gesteigerten Importrate und einem möglichen C-Verlust in anderen produzierenden Ländern führen. Solche potenziellen „Leakage“-Effekte außerhalb der Projektgebiets müssen geschätzt und mitberücksichtigt werden.

## **Spezifisches Sequestrierungs - Potenzial**

In Böden, die bereits innerhalb des Optimums des standortsspezifischen Humusgehalts liegen, kann eine nachhaltige Erhöhung kaum erreicht werden. Sehr wohl sind aber Maßnahmen zur Erhaltung des optimalen Gehalts möglich. Auch die absolute Höhe des möglichen Gehalts ist stark von den Standortbedingungen abhängig. Diese Aspekte sollten von Zertifizierungssystemen ebenfalls berücksichtigt werden.

## **Einfluss durch Erosion**

Aufgrund des signifikanten Anstiegs von Starkregenereignissen ist das Risiko von Bodenabträgen bzw. Erosionen gestiegen. Daher kann es trotz optimierter Bewirtschaftung zu Verlusten des Oberbodens kommen, womit natürlich auch ein Humusverlust verbunden ist. Im Optimalfall sollten aber humusfördernde Maßnahmen auch zu einem verminderten Erosionsrisiko führen.

## **Anforderungen an Zertifizierungssysteme**

Grundsätzlich wären international einheitliche Vorgaben für Zertifizierungssysteme wünschenswert. Derzeit wird im Rahmen des European Joint Program (EJP) Soil an möglichen Kriterien gearbeitet. Dabei sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

- Vorlage eines Projektkonzepts für die geplanten Maßnahmen und deren Umsetzung unter Berücksichtigung der Wirkungen außerhalb des zeitlich und räumlich abgegrenzten Projektgebietes,
- Darstellung und Erfassung der Veränderung der Flüsse im Projektgebiet durch Monitoring bzw. Modellierung,
- Detaillierte, transparente Buchhaltung der festgestellten Kohlenstoffveränderungen und des Handels mit den Zertifikaten und
- Keine Doppeltverrechnung der gespeicherten t CO<sub>2</sub>.

Die Inwert-Setzung sollte erst nach dem Nachweis von Senken erfolgen, vertragliche Langzeit-Garantien der Aufrechterhaltung der Maßnahmen zum Humusaufbau durch die Beteiligten sollten ebenfalls vorgesehen sein. Rücklagen für Verluste von Senken sowie einen Plan zur Kompensation für den Bedarfsfall wären zusätzlich wünschenswert.

## **Resümee**

Grundsätzlich sind alle Instrumente und Systeme zu begrüßen, die Maßnahmen zum Humusaufbau bis zu einem standortspezifischen Optimum in der Bewirtschaftungspraxis implementieren und fördern. Der freiwillige analysebezogene Zertifikatehandel kann auch ein derartiges Instrument sein, wenn alle Unsicherheiten klar und transparent dargestellt und vermittelt werden und Mindestanforderungen eingehalten werden (siehe oben). Auch die

Kosten (Probenahme, Analysen, weitere Projektkosten) und Rückzahlungs- bzw. Kompensationsrisiken im Vergleich zu einem maßnahmenbezogenen Humusaufbau, wie beispielsweise im ÖPUL, sind darzustellen.

### Beispiele für freiwilligen Zertifikatehandel in Österreich:

#### „Humus + Modell Ökoregion Kaindorf“

Das Programm Humus+ entstand im Jahr 2007 im Rahmen der Ökoregion Kaindorf. Diese ist ein Zusammenschluss der drei oststeirischen Gemeinden Kaindorf, Ebersdorf und Hartl, welche sich das mittelfristige Ziel der CO<sub>2</sub> - Neutralität gesetzt haben. Am Programm nehmen mittlerweile über 400 Landwirt:innen mit ca. 5.000 ha aus ganz Österreich und seit 2021 auch Slowenien teil. Das Ziel des gemeinnützigen Vereins ist es, die landwirtschaftlichen Böden durch Humusaufbau zu verbessern, und die Landwirt:innen durch freiwilligen, österreichweiten CO<sub>2</sub> - Zertifikatehandel dabei finanziell zu unterstützen.

Humus+ empfiehlt den teilnehmenden Landwirt:innen sich an folgenden 3 Prinzipien des Humusaufbaus zu orientieren:

Abbildung 20: Die 3 Prinzipien des Humusaufbaus (Gerald Dunst, Ökoregion Kaindorf)



**Vielfalt  
maximieren**



**Photosyntheseleistung  
maximieren**



**Bodenstörungen  
minimieren**

Humusaufbauende Maßnahmen welche diese Prinzipien befolgen, sind in folgender Auflistung dargestellt. Die Umsetzung der Maßnahmen ist für die Landwirt:innen freiwillig und betriebs- und standortspezifisch angepasst anzuwenden:

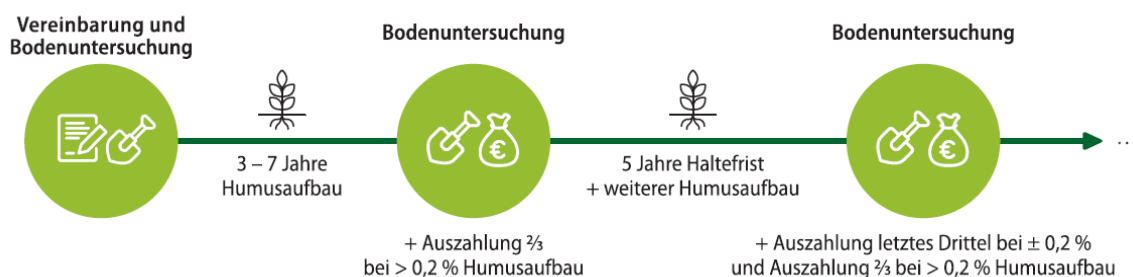
- Dauerbegrünung durch (winterharte) Winterbegrünung, Zwischensaaten, Untersaaten
- Vielfalt durch weite, standortangepasste Fruchtfolgen,
- Minimale Bodenbearbeitung (pfluglos, Mulchsaat, Direktsaat),

- Reduzierung von Agrochemikalien (Mineraldünger, Pestizide, Herbizide, Fungizide),
- Sachgerechte Aufbereitung und Einsatz von organischen Düngern (u.a. Kompost),
- Förderung des Bodenlebens, auch durch vernünftigen Einsatz von Bodenhilfsstoffen (Komposttee, Pflanzenkohle und dgl.) und
- Etablierung von Hecken, Agroforstsystemen.

Landwirt:innen können mit einzelnen Flächen zwischen 1 und 5 ha am Programm teilnehmen. Von diesen Flächen werden die Bodenproben nach ÖNORM L 1054 gezogen. Die Verortung des Humusschlages und der gezogenen Bodenproben erfolgt mit höchster Präzision mittels GPS. Die anschließende Analyse auf organischen Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) wird vom Institut für Pflanzenernährung der AGES durchgeführt. Unter Berücksichtigung des Grobanteils und der Lagerungsdichte wird der Kohlenstoffvorrat in Tonnen  $CO_2$  berechnet. Die Lagerungsdichte wird dabei nicht direkt gemessen, sondern abhängig vom Humusgehalt der ÖNORM L1091:2012 entnommen.

Nach der Startuntersuchung können die Landwirt:innen nach 5 bis 7 Jahren die Erfolgsuntersuchung beauftragen. Kommt es bei dieser Untersuchung zu einem erfolgreichen Humusaufbau ( $> 0,2\%$ ) gibt es eine Auszahlung von  $2/3$  des Erfolgshonorars. In diesem Fall wird nach 5 Jahren eine weitere Untersuchung beauftragt bei welcher kontrolliert wird, wie sich der Humusgehalt entwickelt hat. Bei einem weiteren Aufbau kommt es zu einer neuerlichen Auszahlung, bei einem gleichbleibenden Humusgehalt kommt es zur Ausbezahlung des einbehaltenen  $3.$  Drittels und bei einem Abbau bedarf es einer anteiligen Rückzahlung oder einem anteiligen Einbehalten des  $3.$  Drittels.

Abbildung 21: Schema des Humusaufbauprogramms (Gerald Dunst, Ökoregion Kaindorf)



Die Rechte an diesen zusätzlich im Boden gespeicherten Tonnen  $CO_2$  werden in Form von  $CO_2$  - Zertifikaten an Unternehmen und Privatpersonen verkauft, die ihren unvermeidbaren  $CO_2$  - Ausstoß kompensieren wollen.

Das Humusaufbauprogramm ist ein Pionierprojekt, welches auch international auf Interesse stößt. Durch mittlerweile fast 15 Jahre Praxiserfahrung und die systematische Datenauswertung aller Flächen die sich im Humusaufbauprogramm befinden, können laufend neue Erkenntnisse gewonnen werden. Das Programm befindet sich in kontinuierlicher Weiterentwicklung im Austausch mit der Wissenschaft und der Praxis, um einen höchsten Qualitätsstandard zu gewährleisten und einen wesentlichen Beitrag zur Verbesserung der landwirtschaftlichen Böden und zur Dekarbonisierung der Atmosphäre beizutragen. Im langjährigen Durchschnitt (Stand 2021) sind drei Viertel der Landwirt:innen, die am Programm teilnehmen, erfolgreich im Humusaufbau und konnten auf Einzelflächen im Durchschnitt 1,6t C (entspricht 6 t CO<sub>2</sub>) pro ha und Jahr im Boden stabilisieren. Allerdings wurde beim Kaindorfer Modell nicht berücksichtigt, ob die auf den Einzelflächen erzielten Werte mit einem hohen Anreicherungspotenzial des Bodens (Bodenart) zusammenhängen.

### **„Zukunft Erde“ – das Humusaufbauprogramm der Raiffeisen Lagerhäuser**

„Zukunft Erde“ ist ein, seit Sommer 2020 verfügbares Programm der Lagerhäuser und der RWA Raiffeisen Ware Austria mit dem Ziel, den Humusaufbau in landwirtschaftlichen Böden zu forcieren. Das gelingt, indem Landwirt:innen bei der Generierung von Humus nicht nur von gestärkten Böden profitieren, sondern zusätzlich den im Rahmen des Programms aufgebauten Humus in CO<sub>2</sub>- Herkunftsnachweise umwandeln. Diese Herkunftsnachweise können von Unternehmen erworben werden, die sich klimaneutral stellen möchten. Dieser Prozess ist für Landwirt:innen ein zusätzlicher Anreiz Humus aufzubauen und damit ein wichtiger Beitrag zum Klimaschutz.

Alle Richtlinien hinsichtlich der Bodenprobenahme, der zeitlichen Abläufe, sowie der CO<sub>2</sub>-Berechnung wurden in Zusammenarbeit mit der AGES Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH, unter Berücksichtigung aller relevanten ÖNORMen definiert.

### **Programm-Ablauf (siehe Programm-Darstellung)**

Die Anmeldung zum Programm erfolgt im Lagerhaus vor Ort, oder online unter [www.onfarming.at](http://www.onfarming.at). Nach der Übermittlung aller erforderlichen Informationen betreffend den Betrieb und der teilnehmenden Flächen, wird eine Referenzbodenprobe mit einer GPS-Genauigkeit von 2 cm auf den landwirtschaftlichen Nutzflächen gezogen. Anschließend hat der Landwirt die Möglichkeit im eigenen Ermessen, unter Beachtung bestehender Richtlinien, wie zum Beispiel die der sachgerechten Düngung, Maßnahmen rund um den Humusaufbau zu er-

greifen. Dabei wird er fachlich durch Mitarbeiter:innen der Lagerhäuser beraten und unterstützt. Eine detaillierte Humusbroschüre wird zusätzlich zur Verfügung gestellt. Nach mindestens 3 und maximal 7 Jahren erfolgt die Observierungsprobe. Das Jahr kann jeweils von den teilnehmenden Landwirt:innen bestimmt werden, hingegen ist der Zeitpunkt der Beprobungen jahreszeitlich gleich. Wenn sich der Humusanteil im Zeitraum zwischen der 1. und 2. Beprobung mehr als die definierte Messtoleranz von 0,2 % gesteigert hat, erfolgt eine Erstellung des CO<sub>2</sub>-Herkunftsnachweises und die Auszahlung von 2/3 des Werts. Das letzte Drittel kommt im Sinne der Nachhaltigkeit erst dann zur Auszahlung, wenn der Humusanteil sich wiederum im weiteren Zeitraum von mindestens 3 und maximal 7 Jahren erhöht oder stabilisiert hat.

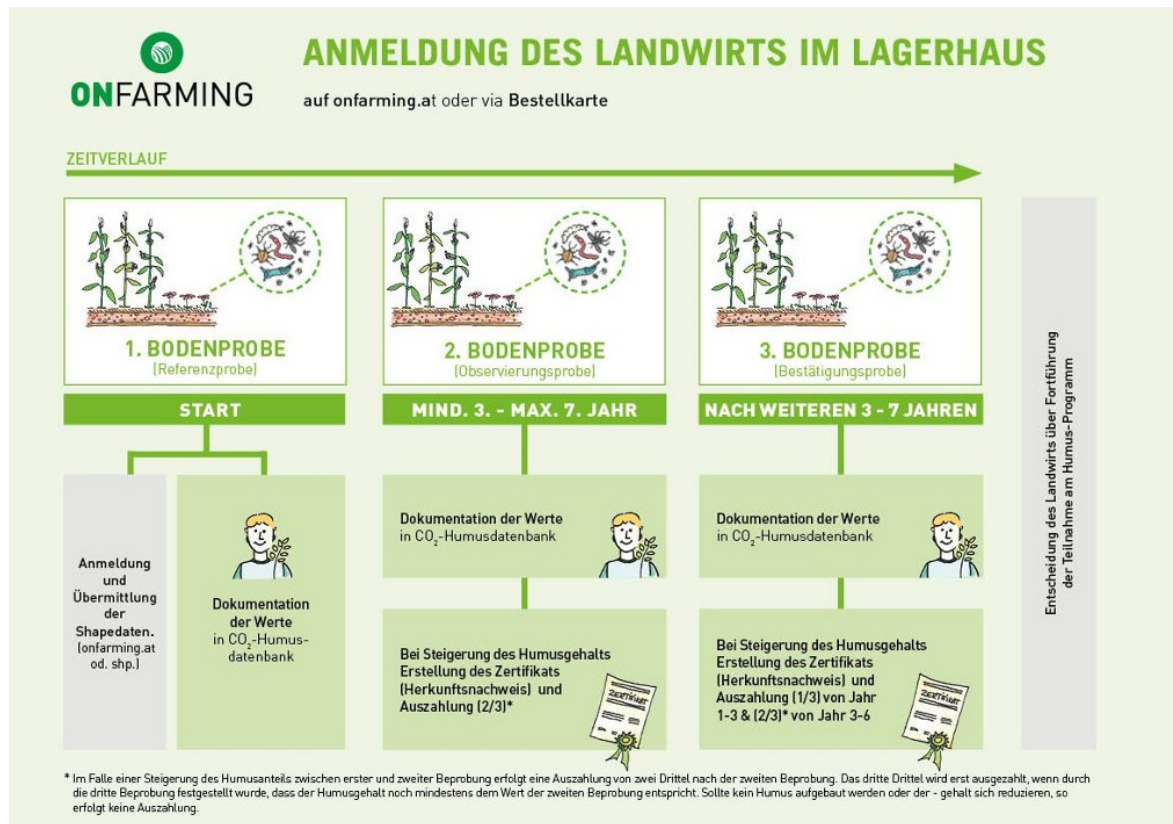
### **Bodenproben-Entnahme und Analyse als Basis des Programms**

Die Wichtigkeit der Bodenprobe und somit des Wissens über die Zusammensetzung und die Ausgangsbasis des Bodens stehen im Vordergrund. Die Bodenproben werden mit Spezialfahrzeugen gezogen. Wichtig ist dabei die Vergleichbarkeit durch die Einhaltung definierter Kriterien, wie zum Beispiel die Beprobungstiefe, oder die Anzahl der Einstiche. Wesentlich ist weiters die wissenschaftliche Unterstützung der AGES, die auf Grundlage der Proben den Humusgehalt bestimmt, der von der RWA in einer Humusdatenbank festgehalten wird. Die Landwirt:innen tragen im Rahmen des Programms die Kosten für die Bodenanalyse, sowie der Teilnahmegebühr.

### **Erhöhung der Wertigkeit des Humusanteils und der Bodengesundheit**

Die Struktur der Lagerhaus Genossenschaften bietet allen Landwirt:innen die Möglichkeit, ohne Risiko Maßnahmen für eine Steigerung des Humusaufbaus zu ergreifen und dabei fachlich bei der Wahl nach geeigneten, standortspezifischen Bewirtschaftungsformen und durch die Produktberatung unterstützt zu werden. Gleichzeitig schafft das Programm die Möglichkeit, den Effekt einer nachhaltigen, klimaschonenden Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen beim öffentlichen Diskurs besser zu positionieren. Die Ertragssicherheit, sowie das Potenzial eines zusätzlichen Zuverdiensts durch die Vermarktung von CO<sub>2</sub>-Herkunftsnachweisen für die Teilnehmer:innen sind weitere positive Effekte.

Abbildung 22: Prozess-Darstellung Humusaufbauprogramm (Claudia Mittermayr, RWA [claudia.mittermayr@rwa.at](mailto:claudia.mittermayr@rwa.at))



### 4.3 Aktuelle Entwicklungen auf EU-Ebene

#### Mitteilung zu nachhaltigen Kohlenstoffkreisläufen:

Die Europäische Kommission hat im Dezember 2021 eine Mitteilung zu nachhaltigen Kohlenstoffkreisläufen veröffentlicht. Dok. 15045/21 (Mitteilung der EK zu „Nachhaltigen Kohlenstoffkreisläufen“):

In der Mitteilung werden unter Verweis auf das EU-Ziel der Klimaneutralität bis 2050 folgende Schlüsselaktionen definiert:

- Reduktion bzw. wenn möglich Beseitigung der großen Abhängigkeit von fossilem Kohlenstoff. Für die Erreichung der Klimaneutralität muss die Verwendung von fossiler Energie um 95 % reduziert werden. Die Dekarbonisierungsstrategie ist ein Kernstück



der Klima-, Umwelt und Energiepolitik, um das 2030 Ziel (- 55 % der EU-Treibhausgase gegenüber 1990) zu erreichen,

- Recycling von Kohlenstoff aus Abfallströmen, aus nachhaltigen Biomassequellen oder direkt aus der Atmosphäre und
- Ausbau und Erweiterung von Lösungen zur Kohlenstoffentnahme aus der Atmosphäre.

Die Mitteilung zur Strategie von nachhaltigen Kohlenstoffkreisläufen konzentriert sich auf Maßnahmen zur Ausweitung des Carbon Farming als Geschäftsmodell, Anreize für Praktiken in natürlichen Ökosystemen um Kohlenstoffbindung zu erhöhen sowie die Förderung einer industriellen Wertschöpfungskette zur nachhaltigen Kohlenstoffabscheidung. Darüberhinausgehend wird auch behandelt, wie Kohlenstoff aus der Atmosphäre recycelt, transportiert und gespeichert werden kann. Im Hinblick auf das Ziel der Klimaneutralität 2050 enthält die Mitteilung daher auch Überlegungen zur weiteren Integration des Kohlenstoffabbaus in den EU-Rechtsrahmen und den Rahmen für die Einhaltung der Vorschriften nach 2030 schaffen.

Carbon Farming als grünes Geschäftsmodell: Nachhaltige Landwirtschaft wird zum Erreichen der Klimaneutralität bis 2050 entscheidend sein. Während Wälder auf EU-Ebene einen jährlichen Netto-Kohlenstoffaufbau verzeichnen, weisen alle anderen Landnutzungen wie Ackerland, Grünland, Feuchtgebiete und Siedlungen insgesamt jährliche Nettoemissionen auf (große Unterschiede zwischen den MS). UNFCCC-Inventare zeigen, dass die Senkenwirkung aus terrestrischen Ökosystemen in der EU in den letzten zehn Jahren rückläufig war, was vor allem auf den Abbau der Senkenleistung durch Holzmobilisierung (erhöhte nachhaltige Nutzung) bzw. durch großflächige Störungen zurückzuführen ist. Vor diesem Hintergrund hat die EK im Rahmen der Änderung der LULUCF VO (EU) 2018/841 ein Unionsziel für den Nettoabbau von 310 MtCO<sub>2</sub>eq bis 2030 vorgeschlagen. Dieser Wert wurde zuletzt im Jahr 2013 erreicht. Weiters wird vorgeschlagen, bis 2035 die Klimaneutralität im gesamten Landsektor zu erreichen. Der Kommissionsvorschlag sieht jedoch keine direkten Anreize für den einzelnen Landbewirtschafter vor, den Kohlenstoffaufbau zu erhöhen und die Kohlenstoffvorräte zu schützen.

Landbewirtschafter:innen sollen aber künftig für verbesserte und nachhaltige Landwirtschaftspraktiken aus öffentlichen oder privaten Quellen belohnt werden. In letzter Zeit ist eine wachsende Zahl privater Carbon-Farming-Initiativen entstanden, da das Potenzial enorm ist und die Nachfrage nach solchen Kohlenstoffgutschriften das Angebot übersteigt.

Die Kohlenstoffbewirtschaftung stellt daher eine neue Einkommensquelle für Landbewirtschafter dar, die in vielen Fällen auch von einer höheren Bodenfruchtbarkeit profitieren können. Gutschriften aus der Kohlenstoffbewirtschaftung sollen die Bemühungen zur Reduzierung von THG-Emissionen ergänzen und helfen, wenn eine weitere THG-Reduzierung nicht mehr möglich ist.

Folgende Landnutzungspraktiken sollen zu einer Erhöhung der Kohlenstoffbindung führen:

- Aufforstung und Wiederaufforstung unter Beachtung ökologischer Grundsätze, die die biologische Vielfalt und eine nachhaltige Waldbewirtschaftung fördern,
- Agroforstwirtschaft u. a. Formen der gemischten Landwirtschaft, bei denen Bäume oder Sträucher mit pflanzlicher und/oder tierischer Produktion auf derselben Fläche kombiniert werden,
- Einsatz von Zwischenfrüchten, Deckfrüchten und konservierender Bodenbearbeitung,
- Umwandlung von Ackerland in Brachland oder von stillgelegten Flächen in Dauergrünland und
- Wiederherstellung von Mooren und Feuchtgebieten, die die Oxidation des vorhandenen Kohlenstoffs reduziert und das Potenzial für die Kohlenstoffbindung erhöht.

Als Hindernisse werden die finanzielle Belastung durch die Kosten der Bewirtschaftungsmethoden bzw. die Ungewissheit über die Einnahmemöglichkeiten sowie die Komplexität und hohe Kosten robuster Überwachungs-, Berichterstattungs- und Überprüfungssysteme sowie unzureichend dafür zugeschnittene Beratungsdienste erwähnt.

Um den Zugang und das Wissen zur Kohlenstoffbewirtschaftung zu erweitern, hat die Kommission ein technisches Handbuch veröffentlicht, indem die wichtigsten Fragen, Herausforderungen, Kompromisse und Gestaltungsoptionen dieses Geschäftsmodells untersucht werden.

Das technische Handbuch, das Ende April 2021 veröffentlicht wurde, behandelt Herausforderungen, Kompromisse und Gestaltungsoptionen zum Thema Carbon Farming. In dieser Studie wurden bereits bestehende Zertifizierungssysteme zu Themen wie Moorreinaturierung, Agroforstwirtschaft, Grünland und zu den Mineralböden untersucht. Einige Hinweise deuten darauf hin, welche Eckpunkte so ein System enthalten könnte wie beispielsweise, dass immer der gesamte Betrieb an einem solchen System teilnehmen sollte. Die untersuchten Systeme haben eine Verpflichtungsdauer von 5 – 25 Jahren, es gibt hier aber noch

keine Schlussfolgerungen welchen Zeitraum die Kommission hier festlegen könnte. Die Erhaltung von Kohlenstoff in Böden, ein für Österreich wichtiges Thema, wird jedenfalls als bedeutend anerkannt. Weiters wird auch erwähnt, dass Landwirt:innen nicht für einen Kohlenstoffabbau, der durch den Klimawandel bedingt ist, verantwortlich gemacht werden können. Es wird die Meinung vertreten, dass ergebnisorientierte Kohlenstoffbewirtschaftung einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten und auch neue Einkommensmöglichkeiten für die Landwirt:innen bieten kann. Es ist seitens der Europäischen Kommission geplant, bis Ende 2022 einen Vorschlag für einen Rechtsrahmen für die Zertifizierung zu entwickeln.

Aktueller Stand bzw. Zusammenfassung der Ideen der Kommission: Nach den derzeit vorliegenden Informationen der EK scheint dies als grober Rahmen für den freiwilligen Markt und für eine Pilotphase für Testzwecke bis 2030 gedacht zu sein. Erst ab 2030 soll so ein Zertifizierungssystem in das bestehende EU-Regelwerk eingebettet werden, aber wie das genau funktionieren soll, ist anhand der derzeitigen Dokumente noch nicht erkennbar. Die Europäische Kommission geht in ihren Dokumenten nicht näher darauf ein, wie die Removals bis dahin wem und wie angerechnet werden sollen, erwähnt aber an mehreren Stellen, dass es keine Doppelzählung („double counting“) der Senkenwirkung geben darf. Ein wichtiger Punkt ist auch, dass es nicht zu „double funding“ kommen darf. Das bedeutet, dass kohlenstofffördernde Maßnahmen im Rahmen eines Carbon Farming Schemes (das Zertifikate verkauft) nicht parallel dazu in einem anderen Fördersystem (wie z. B. der GAP) unterstützt werden dürfen. Die beiden Ansätze einer „action-based“ bzw. einer „result-based“ Förderung, so wie hybride Ansätze werden von der Europäischen Kommission auch im Zusammenhang mit Carbon Farming beschrieben. Eine Verschränkung des Zertifizierungssystems mit den für die Mitgliedsstaaten verbindlichen LULUCF-Zielen für das Staatsgebiet in der Verpflichtungsperiode bis 2030 oder konzeptionelle Ideen dazu sind in den vorliegenden Papieren ebenfalls nicht ersichtlich. Am 30. November 2022 wurde der „Vorschlag für einen EU-weiten freiwilligen Rahmen zur Zertifizierung zum Kohlenstoffabbau“ seitens der europäischen Kommission veröffentlicht ([https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles\\_en#a-regulatory-framework-for-the-certification-of-carbon-removals](https://climate.ec.europa.eu/eu-action/sustainable-carbon-cycles_en#a-regulatory-framework-for-the-certification-of-carbon-removals)).

## **Mission Soil Health**

Missionen sind zukünftig neuer und integraler Bestandteil des Rahmenprogramms für Forschung und Innovation – Horizon Europe – das 2021 begonnen hat. Insgesamt sind 5 the-

matisch unterschiedliche Missionen geplant und zwar zu Smart Cities, Klimawandelanpassung, Krebs und Wasser. Für Boden ist eine eigene Mission mit dem Titel „A Soil Deal for Europe“ vorgesehen. Für diese Mission wurde als Überziel die Einrichtung von 100 living labs und lighthouses in der EU festgelegt. Die Missionen sollen messbare Ziele erreichen und zu den Zielen des Green Deals beitragen. Die Vorschläge für den Inhalt der Mission wurden von Expertengremien „Mission Boards“ erarbeitet, die die Kommission eingerichtet hat. Für die Mitarbeit im Mission Board konnten sich Expertinnen und Experten aus ganz Europa direkt bei der Kommission um einen der Sitze im sogenannten Mission Board bewerben. Pro Mission wurde ein Mission Board mit 15 Expertinnen und Experten eingerichtet. Alfred Grand hat als einziger Österreicher im Mission Board der Soil Mission mitgearbeitet. Diese Expertinnen und Experten haben im September letzten Jahres ihren Bericht an die Kommission übergeben. Es wurde als Ziel vorgeschlagen, dass bis 2030 75 % der Böden in der EU gesund sein sollen. Dieses Ziel wurde dann auch noch heruntergebrochen auf Unterziele z. B. betreffend Erosion, Bodenversiegelung und andere. Da die Miteinbeziehung der Praktikerinnen und Praktiker eine wichtige Rolle spielt wurden auch Ziele für die Einrichtung von Living Labs und Lighthouses definiert. Auch die Beteiligung der Öffentlichkeit ist ein wesentlicher Punkt in diesem neuen Programm. Im September 2021 wurden von der Kommission die Umsetzungspläne veröffentlicht. Zur Erarbeitung von Umsetzungsvorschläge der Missionen in Österreich wird pro Mission eine „Mission Action Group“ eingerichtet. Diese Gruppen nahmen Ende 2021 ihre Tätigkeit auf. Bis zum Sommer 2022 haben diese Arbeitsgruppen nun ihre Empfehlungen ausgearbeitet und der Politik vorgelegt. Derzeit bleibt abzuwarten, welche der Empfehlungen nun von der Politik aufgegriffen und umgesetzt werden.

## **Green Deal**

Die Mitteilung zum Europäischen Grünen Deal wurde von der Europäischen Kommission am 11. Dezember 2019 vorgelegt. Der Green Deal spricht insgesamt 11 Themenfelder an, die für die Landwirtschaft und den ländlichen Raum in einigen Querschnittsbereichen Relevanz haben werden.

Diese Themenfelder sind:

- Mobilisierung von Forschung und Förderung von Innovation,
- Null-Schadstoff-Ziel für eine schadstofffreie Umwelt,
- Ökosysteme und Biodiversität erhalten und wiederherstellen,

- „Vom Hof auf den Tisch“ (*farm to work*): ein faires, gesundes und umweltfreundliches Lebensmittelsystem,
- Raschere Umstellung auf eine nachhaltige und intelligente Mobilität,
- Ambitioniertere Klimaschutzziele der EU für 2030 und 2050,
- Versorgung mit sauberer, erschwinglicher und sicherer Energie,
- Mobilisierung der Industrie für eine saubere und kreislaforientierte Wirtschaft,
- Energie- und ressourcenschonendes Bauen und Renovieren,
- Finanzierung der Wende und
- Niemanden Zurücklassen (gerechter Übergang).

Übergeordnetes Ziel ist die Erreichung der Klimaneutralität Europas bis 2050 unter Berücksichtigung der sozialen Gerechtigkeit: Niemand, weder Mensch noch Region, soll bei dem anstehenden Zeitenwandel im Stich gelassen werden. Der Green Deal wird von der Europäischen Kommission als allumfassende und horizontale Strategie für die Zukunft der EU gesehen.

Im Rahmen der zum Green Deal gehörenden Biodiversitätsstrategie, die 2020 veröffentlicht wurde, ist auch eine neue EU-Bodenschutzstrategie angekündigt. Die jetzt noch gültige Strategie stammt aus 2006 und diese soll nun grundlegend überarbeitet werden. Darin sollen Themen behandelt werden wie Bodenerosion, Bodenkohlenstoff und die biologische Vielfalt im Boden. Weiters hat sich die Kommission auch zum Ziel gesetzt, die Themen Flächeninanspruchnahme, Altlasten und die Landdegradationsneutralität in dieser Strategie zu behandeln. Als Vorbereitung der EU-Bodenstrategie gab es in den letzten beiden Jahren einen Öffentlichkeitsbeteiligungsprozess, der bereits abgeschlossen ist. Das Thema Boden ist aber auch in zahlreichen weiteren zum Green Deal gehörenden Aktivitäten enthalten wie beispielsweise in den Fit for 55 Vorschlägen zum Klimaschutz, in denen das Thema Landnutzungen und Landnutzungsänderungen eine große Rolle spielen. Darüberhinausgehend wird das Bodenthema auch in den sog. „restoration targets“ eine Rolle spielen, die die Kommission ebenfalls in der Biodiversitätsstrategie angekündigt hat.

## **EU-Bodenstrategie**

Die EK hat am 17. November 2021 als eine weitere Initiative zur Umsetzung des „Green Deals“ eine EU-Bodenstrategie für 2030 vorgelegt. Diese Bodenstrategie ist eng verknüpft mit anderen EU-Initiativen, wie z. B. der Biodiversitätsstrategie 2030, der Umsetzung des Klimaziels für 2030 im Rahmen des FF55 Pakets oder dem EU-Aktionsplan zur Schad-

stofffreiheit von Luft, Wasser und Boden. Gesunde Böden sind u.a. eine wesentliche Voraussetzung für Klimaneutralität, eine saubere und kreislauforientierte Wirtschaft, den Stopp des Verlusts der biologischen Vielfalt, die Bereitstellung gesunder Nahrungsmittel, den Schutz der menschlichen Gesundheit und die Eindämmung von Wüstenbildung und Bodendegradation. Die Strategie bildet einen Rahmen mit konkreten Maßnahmen für Schutz, Wiederherstellung und nachhaltige Nutzung der Böden und schlägt eine Reihe freiwilliger sowie rechtsverbindlicher Maßnahmen vor. Mit den in dieser Strategie enthaltenen Vorschlägen soll der Gehalt an organischem Kohlenstoff in landwirtschaftlich genutzten Böden erhöht, die Wüstenbildung bekämpft, geschädigte Flächen und Böden saniert und bis 2050 dafür gesorgt werden, dass alle Bodenökosysteme einen gesunden Zustand erreichen.

#### Mittelfristige Ziele bis 2030:

- Wiederherstellung degradierter Flächen und Böden (Ziel 15.3 der nachhaltigen Entwicklung),
- Wiederherstellung verloren gegangener kohlenstoffreicher Ökosysteme,
- Erreichen eines Netto-Treibhausgasabbaus in der EU von 310 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent pro Jahr im Sektor Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft (LULUCF),
- Erreichen eines guten ökologischen und chemischen Zustands der Oberflächengewässer und eines guten chemischen und mengenmäßigen Zustands des Grundwassers bis 2027,
- Verringerung der Nährstoffverluste um mindestens 50 %, des Gesamtverbrauchs. Reduzierung chemischer Pestizide um 50 % sowie des Einsatzes von gefährlich eingestuften Pestiziden um 50 % bis 2030 und
- erhebliche Fortschritte bei der Sanierung schadstoffbelasteter Flächen.

#### Langfristige Ziele bis 2050:

- Erreichen von Netto-Null-Flächenverbrauch,
- Verringerung der Bodenverschmutzung auf ein Niveau, das als nicht mehr schädlich für die menschliche Gesundheit und die natürlichen Ökosysteme gilt und die für unseren Planeten hinnehmbaren Grenzen einhält, sodass eine schadstofffreie Umwelt geschaffen wird,
- Erreichen eines klimaneutralen Europas und als ersten Schritt die Klimaneutralität des Bodens in der EU bis 2035 und

- Schaffung einer klimaresistenten Gesellschaft in der EU, die bis 2050 vollständig an die unvermeidlichen Auswirkungen des Klimawandels angepasst ist.

Zur Erreichung dieser Ziele wird die EK 2023 ein Bodengesundheitsgesetz vorlegen, welches von einem Impact Assessment begleitet werden soll.

Auszug aus den vorgeschlagenen Maßnahmen bzw. Initiativen der Europäischen Kommission sowie der Mitgliedstaaten die Erreichung gesunder Böden:

- Wiederherstellung von Torfgebieten (Schutz von bestehenden),
- Beteiligung an der internationalen Initiative „4 per 1000“ zur Erhöhung des Bodenkohlenstoffes auf landwirtschaftlichen Flächen,
- EU-Initiative für die klimaeffiziente Landwirtschaft sowie einen Legislativvorschlag zur Zertifizierung des CO<sub>2</sub>-Abbaus,
- Nachvollziehbare Ströme von Bodenaushub in der Europäischen Union - „Bodenaushub-Pass“,
- Mitgliedstaaten sollen bis 2023 ehrgeizige nationale, regionale und lokale Ziele zur Verringerung des Nettoflächenverbrauchs bis 2030 festlegen, als messbaren Beitrag des „zero net land take“ bis 2050,
- Förderung der biologischen Vielfalt des Bodens durch eine Bewertung von Böden,
- EK will bis 2022 eine erste Bewertung der biologischen Vielfalt von Böden, welche unterschiedlichen Bewirtschaftungsmethoden unterliegen, veröffentlichen,
- Förderung nachhaltiger Bodenbewirtschaftung,
- Einrichtung der Initiative "TEST YOUR SOIL FOR FREE" – Finanzierung soll durch die MS erfolgen,
- Festlegung der Methodik und einschlägiger Indikatoren, zur Bewertung des Ausmaßes von Wüstenbildung in der EU,
- Langfristige Maßnahmen zur Verhinderung und Abschwächung der Bodendegradation,
- Zulassungen und Beschränkungen chemischer Stoffe (REACH),
- Erstellung einer EU-Prioritätenliste für besondere Schadstoffe,
- Errichtung eines Systems von Bodengesundheitszertifikaten für Grundstückstransaktionen,
- Verstärkung digitaler Instrumente und Copernicus Daten,
- Entwicklung von Nachhaltigkeitsinstrumenten für Nährstoffe in landwirtschaftlichen Betrieben (FaST),
- Einführung eines Verschmutzungsmoduls in die künftige LUCAS-Bodenerhebung,

- Entwicklung eines „Boden-Dashboards“ mit Bodenindikatoren,
- Ehrgeizige Fahrpläne im Bereich Bodenforschung und Innovation im Rahmen der Mission „A Soil Deal for Europe“ und
- Förderung der Entwicklung und Nutzung digitaler und ferngesteuerter Sensoren und Apps zur Bewertung der Bodenqualität.

### **EU-Verordnung über die Wiederherstellung der Natur**

Die EK hat am 22. Juni 2022 als eine weitere Initiative zur Umsetzung des „Green Deals“ einen Vorschlag für eine EU-Verordnung über die Wiederherstellung der Natur vorgelegt. Diese Verordnung ist eng verknüpft mit anderen EU-Initiativen, wie z. B. der Biodiversitätsstrategie 2030 oder der Umsetzung des Klimaziels für 2030 im Rahmen des FF55 Pakets. In dieser Verordnung spielt auch das Thema Boden eine große Rolle. Es wird beispielsweise vorgeschlagen, dass die Mitgliedstaaten auf nationaler Ebene einen Aufwärtstrend bei verschiedenen vorgeschlagenen Indikatoren für landwirtschaftliche Ökosysteme erreichen muss, bis ein zufriedenstellender Wert erreicht ist. Einer der Indikatoren ist auch der Bodenkohlenstoff in mineralischen Ackerböden. Außerdem werden auch verbindliche Zielsetzungen für die Wiedervernässung von landwirtschaftlich genutzten organischen Böden vorgeschlagen, bei denen es sich um trockengelegte Torfmoorflächen handelt. Derzeit finden dazu auf Ebene einer Ratsarbeitsgruppensitzung erste Diskussionen zwischen den Mitgliedstaaten und der Kommission über diesen Vorschlag statt.



# 5 Good Practice Beispiele für klimaangepasste und humusaufbauende/humuserhaltende Landwirtschaft auf Betriebsebene

## Betriebe des Vereins Boden.Leben

### **Betrieb 1**

Rodingersdorf, Niederösterreich

Ackerbau, Rindermast und Kompostherstellung

Auf dem Betrieb wird schon lange Humusaufbau betrieben durch intensiven Zwischenfruchtanbau, Kompostausbringung und reduzierte Bodenbearbeitung. Es wird hoher Wert auf das Schließen von Kreisläufen gelegt um Wirtschaftsdünger effizienter einsetzen zu können. Seit einigen Jahren wird Raps mit Begleitpflanzen angebaut um die positiven Effekte von Mischkulturen zu nutzen. Bei der Bodenbearbeitung wird die Bearbeitungstiefe immer weiter reduziert um Wasser im Boden zu halten und auf einzelnen Feldern wird mit Direktsaat experimentiert.

### **Betrieb 2**

Lackendorf, Burgenland

Milchproduktion und Direktvermarktung

Der Betrieb in Lackendorf hat sich dem Bodenschutz ganz und gar verschrieben. Der Betriebsleiter setzt auf ein eigens entwickeltes Bewirtschaftungssystem mit Direktsaat und Streifenbearbeitung mit gleichzeitiger Gülleausbringung. Der Wirtschaftsdünger der Milchkühe wird kompostiert um ihn noch aufzuwerten und die Gülle wird aufbereitet um deren Düngewirkung zu verbessern. So kann gänzlich auf zugekauften Dünger verzichtet werden. Durch ständig bewachsene Felder kann er auch im sehr trockenen Burgenland auf Sandböden ausreichend qualitatives Futter für seine Kühe produzieren.

### Betrieb 3

Umbach, Niederösterreich

Ackerbau

Intensiver Zwischenfruchtanbau und reduzierte Bodenbearbeitung sind am Betrieb ein Muss. Zwischen jeder Kultur wird so schnell wie möglich eine Begrünung ausgesät um den Boden so wenig wie möglich unbedeckt zu lassen und dem Bodenleben Nahrung zur Verfügung zu stellen. Biodiversität steht hier an oberster Stelle, daher enthalten die Zwischenfruchtmischungen auf den Feldern zwischen 8 und 18 unterschiedliche Pflanzen die den Boden aufschließen und ihn fruchtbar halten.

## Betriebe der Boden.Wasser.Schutz.Beratung Oberösterreich

### Betrieb 4

Rohr im Kremstal, Oberösterreich

#### Kurzbeschreibung des Betriebs:

Ackerbau + Schweinemast (ca. 400 Stück);  
GVE 1,7 – 1,8 je ha (schwankend), konventioneller Betrieb,  
Betriebsgröße: 45 ha inkl. Wald, 39,5 ha Landwirtschaftliche Nutzfläche  
39,5 ha/400 Tiere = 0,09875 ha LN/Tier

#### Fruchtfolge:

Soja, Weizen, Mais, Hirse, Ackerbohnen und Zwischenfruchtanbau (Mischungspartner 4-6 Mischungspartner bzw. DSV Mischungen mit mehr als 8 Mischungspartnern)  
ZWF-Anbau seit 90er Jahren (damals großteils Senf – jetzt DSV Mischungen mit mehr als 8 Mischungspartnern).  
Im Durchschnitt 30-50 % begrünt seit 2015. 2019 auf 2020 waren 100 % der Flächen begrünt.

**Besonderheiten des Betriebs** z. B. Humusaufbau durch intensiven Zwischenfruchtanbau, Mähdruschsaat seit etwa 4 Jahren, reduzierte Bodenbearbeitung: seit den letzten 8 Jahren immer weniger Pflugeinsatz und jetzt nur mehr in Ausnahmefällen (bspw. für Versuchsanbau, wenn in Versuchsfrage gefordert wird).

Wirtschaftsdünger: Güllefass mit Schleppschlauch und Verschlauchung hofnaher Flächen.

Bei der Bodenbearbeitung wird die Bearbeitungstiefe immer weiter reduziert um Wasser im Boden zu halten und auf einzelnen Feldern wird mit Direktsaat (seit 2019 – Weizen tw., Soja, Raps Anbau für Bauern in der Umgebung) experimentiert

Humusgehalte: die Humusgehalte befinden sich in einem Bereich zwischen 2,5 und 3,2 %; Im Vergleich von Flächen zwischen 2002 und 2015 konnten mit diesen Maßnahmen im Durchschnitt die Humusgehalte gleich gehalten bzw. leicht gesteigert werden.

## Betrieb 5

Enns, Oberösterreich

Vollerwerbsbetrieb in biologischer Wirtschaftsweise, mit Spezialisierung auf Ackerbau, Direktvermarktung und Kompostierung. Ein wichtiger Aspekt in ihrer Betriebsführung ist der Gedanke an regenerative Landwirtschaft und aktive Humuswirtschaft.

- Ackerland 36,38 ha
- Grünland 0,58 ha
- Summe landw. Fläche 36,96 ha
- Sonstige Flächen 0,75 ha
- Gesamtfläche 39,06 ha
- Betriebsspiegel:
  - Direktvermarktung von Bio-Spargel/ Erdbeeren/ Rhabarber [www.biohofmann.at](http://www.biohofmann.at)
  - Kompostieranlage „[www.derkompost.at](http://www.derkompost.at)“

### Fruchtfolge:

Soja, Weizen, Dinkel, Körnermais und seit einem Jahr Zuckerrüben;

saisonale Vermarktung von Spargel (7 ha) bzw. Erdbeeren und Rhabarber als Spezialisierung im Bereich Gemüsebau

Damit eine ganzjährige Bodenbedeckung gewährleistet wird, spielt der Zwischenfruchtanbau eine tragende Rolle. Zum Teil wird nach Getreidekulturen, auf welche anschließend eine Sommerung folgt, eine „zweifach Begrünung“ durchgeführt. Im Anschluss der Getreideernte wird eine schnellwachsende Zwischenfrucht gesät, welche bereits Ende August umgebrochen wird. Der Bestand wird in einer Tiefe von 3 cm mittels Bodenfräse eingearbeitet. Zeitgleich werden Milchsäurebakterien „Fermente“, für die verbesserte Pflanzenrotte, ausgebracht. Abschließend wird eine winterharte Begrünung angelegt.

Auch im Spargelbereich arbeitet der Betrieb mit Zwischenfrüchten. Hierzu werden diverse Begrünungsmischungen zwischen den Spargeldämmen angelegt und auf Wurzeleistung sowie Unkrautunterdrückung getestet.

Mittels einer Untersaat in Kulturen wie Getreide und Mais wird ein Teil der notwendigen Nährstoffe für die Hauptkultur zur Verfügung gestellt und der Boden vor Erosion geschützt. Hier wird vorwiegend mit späten englischen Raygräsern und verschiedenen Kleearten gearbeitet. Der Anbau der Untersaat im Körnermais erfolgt im Zuge der letzten Unkrautbekämpfungsmaßnahme mittels Feinsamenstreuer am Hackgerät.

Winterharte Begrünung vor Bio-Zuckerrüben

Komposttee als Düngimpuls

**Düngung:** es werden pro Jahr 150 m<sup>3</sup> fertiger Kompost auf zwei Kulturen aufgeteilt

**Humusgehalt:** die Humusgehalte der Ackerflächen liegen in einem Bereich von 2,8 bis 3,3 %

## Betrieb 6

Perg, Oberösterreich

Arbeitskreismitglied beim BIO Ackerbau Perg

Humusaufbau durch intensiven Zwischenfruchtanbau, reduzierte Bodenbearbeitung. Es wird hoher Wert auf das Schließen von Kreisläufen gelegt. Es werden immer wieder Sonderkulturen im Betrieb angebaut. Boden- und Gewässerschutz hat einen sehr hohen Stellenwert durch Anbau von Zwischenfrüchten, reduzierte Bodenbearbeitung. Intensivere Bodenbearbeitung nur bei Unkrautproblemen. Teilnehmer beim EIP Projekt Mulchsaaten und Hacktechniken – Erosionsschutz bei Reihenkulturen.

Durchschnittliche Humusgehalte 2,6 % (EUF-VDLUFA-Standard)

## Betrieb 7

Rohr im Kremstal, Oberösterreich

**Kurzbeschreibung des Betriebs:** konventioneller Ackerbau und Schweinezuchtbetrieb, ca. 1,8 GVE/ha, Wirtschaftsdünger (Mist/Jauche, Gülle)

**Kulturen:** Ackerbohne, Soja, Wintergerste, Körnermais, Raps, Begrünungskulturen

**Fruchtfolgegestaltung** in den Varianten:

- Ackerbohne-Wintergerste-Mais-Mais

- Soja-Wintergerste-Mais-Mais

in den letzten Jahren wurde die Fruchtfolge auf:

- Wintergerste-**Raps (zur besseren Gülleverwertung im Herbst)**-Mais-Mais oder

- Wintergerste-Soja-Mais-Mais umgestellt.

**Begrünung** auf 100 % der Flächen

Zwischenfruchtanbau: meist bestehend aus großzügigen Mischungen (Alexandrinerklee, Sonnenblume, Sommerwicke, Phacelia,.....) - kein Senf und kein Ölrettich in den Mischungen enthalten

**Besonderheiten des Betriebs:**

**Intensiver Zwischenfruchtanbau seit 40 Jahren** und **reduzierte Bodenbearbeitung seit 30 Jahren**. Es wird hoher Wert auf das Schließen von Kreisläufen gelegt um Wirtschaftsdünger effizienter einsetzen zu können - Raps wird deshalb zur besseren Gülleverwertung im Herbst in der Fruchtfolge belassen. Raps wird seit letzter Saison mit Begleitpflanzen (Rüben) angebaut um die positiven Effekte aus pflanzenbaulicher Sicht zu nutzen (Thema Pflanzenschutz).

Dem Boden, der Kultur und der Witterung angepasste Bodenbearbeitung und Bearbeitungstiefe. Bearbeitungstiefe in den letzten 30 Jahren **zwischen 3-15 cm**. Im Einsatz sind Grubber, Spatenrollegge und Scheibenegge.

Es wird auf eine möglichst geringe Anzahl an Überfahrten geachtet.

Zum Zwischenfruchtanbau wird vermehrt die Technik der Mähdruschaat genutzt und auf einzelnen Feldern wird mit Direktsaat experimentiert.

Düngung: der am Betrieb anfallende Mist wird vor dem Maisanbau ausgebracht und möglichst innerhalb von 2 Stunden eingearbeitet. Ebenso wird auf bodennahe Gülleausbringung geachtet.

Entwicklung der Humusgehalte (Analysen: CEWE)

| Feldstückbezeichnung                                                            | Jahr 2002 | Jahr 2008 | Jahr 2015    |
|---------------------------------------------------------------------------------|-----------|-----------|--------------|
| Zauner Grabenfeld                                                               | 2,6 %     | 2,9 %     | 2,8 %        |
| Holzhüttenfeld                                                                  | 3,2 %     | 2,9 %     | <b>2,4 %</b> |
| Schmidfeld                                                                      | 2,8 %     | 2,9 %     | 2,8 %        |
| <b>Anmerkung zu Probenahmezeitpunkt: Herbst bis Winter (in Vegetationsruhe)</b> |           |           |              |

## Betrieb 8

Niederneukirchen, Oberösterreich  
Biobetrieb seit 2006

Kleine Teilflächen sind erosionsgefährdet. In der Vergangenheit kam es einmal auf einem Feldstück, welches nicht sehr steil, aber lang ist, zu Bodenabtrag, worauf das Feldstück geteilt wurde. Der Verbleib des wertvollen Bodens am Feld ist dem Betriebsleiter ein wichtiges Anliegen.

Bio-Ackerbaubetrieb, Futter- Mist- Kooperation, Betriebsgröße (40 ha), mehrjähriger Feldfutterbau in der Fruchtfolge

Die Fruchtfolge beginnt mit Klee gras, welches so lange wie möglich stehen gelassen wird, bestenfalls 4 Jahre, je nach Verunkrautung mit Ampfer oder der Bestand mit Luzerne.

Danach folgt Mais, Dinkel, Roggen, Hafer oder Weizen.

Lück enfüller sind Rübe, Soja, Kümmel, Fenchel (sollte auch 5 Jahre stehen), Kürbis oder Braugerste.

Die Besonderheiten des Betriebs sind die Maßnahmen zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit wie Untersaaten bei allen Getreidearten und der mehrjährige Klee grasanbau (Ziel sind 4 Jahre) in der Fruchtfolge, sowie eine Futter-Mist-Kooperation zum Schließen der Kreisläufe. Wobei hier wiederum der Wirtschaftsdünger in Form von Mist zum mehrjährigen Klee grasbestand kommt. BIO Stallmist und BIO Rindergülle auf Klee gras im 2,3 und 4 Jahr: 5-10 t/ha. Gülle kommt auch auf Mais und Winterweizen: 10-15 m<sup>2</sup>/ha. Die Untersaaten (Leguminosenmischungen) verbleiben am Feld. Begrünungsmanagement beim Klee gras: der 1. Schnitt wird abhängig vom Wetter zu Silage oder Heu verarbeitet, 2. und 3. Schnitt wird zu Heu und der 4. Schnitt ist ein Reinigungsschnitt, welcher am Feld verbleibt. Die Kalkung erfolgt auf den Klee grasbestand, wenn das Feld gut befahrbar ist. Der Pflug wird nur nach Bedarf und sehr gezielt eingesetzt. Nur vor dem mehrjährigen Klee grasanbau erfolgt eine Bodenbearbeitung. Die Untersaaten sind ein Beitrag zur Reduzierung der Bodenbearbeitung. Die mechanische Beikrautregulierung erfolgt je nach Kultur mit dem Striegel und/ oder einem Hackgerät. Ein wesentlicher Teil der Beikrautregulierung ist der mehrjährige Klee grasanteil und regelmäßiger Schnitt mit Abfuhr des Klee grasses, sowie eine vielseitige Fruchtfolge. Die regelmäßige Kalkung und der Humusaufbau tragen weiter zur Bodenfruchtbarkeit der Ackerflächen bei. Bodenruhe und Nahrung für Bodenlebewesen haben einen großen Stellenwert am Betrieb.

Zitat Landwirt: „Die Bodenruhe ist etwas ganz Entscheidendes in der Bodenbearbeitung. Umso länger keine Bearbeitung, desto unruhiger wird es im Boden.“

Eine wesentliche Erfahrung des Betriebsleiters zum Nährstoffmanagement ist, dass man umso länger zehrt, je länger das Klee gras steht: 1-2-jähriges Klee gras gute Folgefrucht, 2-3-jähriges Klee gras guter Mais, Dinkel und Roggen, 3-4-jähriges Klee gras guter Mais, Dinkel, Roggen, Hafer und nochmals Mais.

Humusgehalte zwischen 2,7 und 4 %

## Betriebe aus dem Projekt BIOBO:

Das EIP-Projekt (Europäische Innovationspartnerschaft) „Ertragsentwicklung und Humusaufbau über reduzierte Bodenbearbeitung und organische Düngungsmaßnahmen (Gründüngung und organische Dünger)“, kurz „BIOBO“ (biologischer Boden) begleitete Landwirtinnen und Landwirt:innen von biologisch wirtschaftenden Betrieben, die schon seit geraumer Zeit die reduzierte Bodenbearbeitung anwenden, bei der Optimierung ihrer Bodenbearbeitungssysteme und Gründüngungsmaßnahmen.

Landwirt:innen aus Niederösterreich, Berater von BIO AUSTRIA NÖ und Wien sowie WissenschaftlerInnen der Universität für Bodenkultur in Wien und des FIBL (Forschungsinstitut für biologischen Landbau) Österreich haben eine operationelle Gruppe für den Austausch von Erfahrungen zwischen Praxis, Beratung und Forschung gebildet. Dieses EIP-Projekt wurde vom Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, den Bundesländern und der Europäischen Union gefördert.

### Betrieb 9

Marchfeld, Niederösterreich, 154 m Seehöhe

Praxis-Forschungsbetrieb Rutzendorf, Landwirtschaftliche Bundesversuchswirtschaften GmbH – Versuchsbetrieb im Projekt BIOBO; <https://www.bio-austria.at/download/biobo-broschuere/>

**Marktfurchtbetrieb; viehlos;** Organisch-biologische Wirtschaftsweise, 143 ha Ackerfläche (arrondiert), 6 km Hecken und Baumreihen, Nützlingsfördernde Blühstreifen auf 3,6 % der Ackerfläche

**Fruchtfolge 8-jährig:** Luzerne - Luzerne - Winterweizen (+ZF) - Körnermais - Sommergerste (+ZF) - Körnererbse (+ZF) - Winterweizen - Winterroggen; (ZF ... Zwischenfrucht)

Seit dem Jahr 2003 wird auf dem Praxis-Forschungsbetrieb Rutzendorf vom Institut für Ökologischen Landbau der BOKU und verschiedenen Partnern untersucht, wie sich die Umstellung auf den biologischen Landbau auf Bodenfruchtbarkeit, Ertragsentwicklung und Artenvielfalt auswirkt. Die Leitung und Bewirtschaftung des Betriebes erfolgt durch die Landwirtschaftlichen Bundesversuchswirtschaften GmbH (BVW). Der Betrieb liegt im trockenen Osten Österreichs. Als Folge des Klimawandels treten längere und ausgeprägtere Trockenperioden auf, die Jahresdurchschnittstemperatur und die Verdunstungsraten nehmen zu. Auch der Bio-Landbau steht damit vor der Frage: „Wie können wir zukünftig die Erträge auch bei geänderten Klimabedingungen sichern?“ Mit den Daten der Langzeituntersuchung auf dem Betrieb können verschiedene Anpassungsstrategien an die Auswirkungen des Klimawandels in einem biologisch bewirtschafteten Ackerbausystem beschrieben und deren Auswirkungen auf Bodeneigenschaften und die Ertragsentwicklung aufgezeigt werden. Die Grundlage der Strategien ist eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung mit dem Ziel, die Bodenfruchtbarkeit zu erhöhen um damit Klimawandel bedingte Ertragseinbußen zu mindern. Die Strategien sind miteinander verbunden und beeinflussen sich gegenseitig.

**Strategie „Fruchtfolge“:** Am Betrieb wird eine 8-feldrige Fruchtfolge umgesetzt, welche die Basis für die Stickstoff- und Humusversorgung der Böden bieten soll und eine vorbeugende Regulierung von Unkräutern, Krankheiten und Schädlingen berücksichtigt. Grundgerüst der Fruchtfolge ist der Anbau von Leguminosen als Hauptfrüchte, in drei der acht Jahre ergänzt durch Zwischenfrüchte.

**Strategie „Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf“:** Verschiedene organische Düngungsvarianten bzw. -systeme mit und ohne Tierhaltung werden untersucht. Die Systeme unterscheiden sich hinsichtlich der Art, Menge und Verteilung der Zufuhr von organischer Substanz und der Einbringung von Nährstoffen in das Betriebssystem. Die Fruchtfolge inklusive der Zwischenfrüchte und die Bodenbearbeitungsmaßnahmen sind gleich gestaltet.

**Strategie „Bodenbearbeitung“:** Seit dem Herbst 2015 ist die Intensität der Grundbodenbearbeitung am Betrieb durch den Umstieg von Pflug auf Flügelschar-Grubber und der Reduktion der Bodenbearbeitungstiefe verringert. Das Ziel dieser Strategie ist, den Boden weniger tief und intensiv zu bearbeiten, damit die Bodenstruktur und das Bodenleben zu schonen und den Wasserhaushalt zu verbessern.

## Betrieb 10

Wienerwald, Niederösterreich, 230 m Seehöhe

Versuchsbetrieb im Projekt BIOBO; Versuchsthema „Zwischenfruchtbegrünungen abfrierend vs. winterhart vor Körnermais“

<https://www.bio-austria.at/download/biobo-broschuere/>

**Marktfruchtbetrieb; viehlos;** biologische Wirtschaftsweise, Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung im Jahr 2008; 10,7 ha

**Fruchtfolge 7-jährig:** Luzerne/Gras - Winterweizen (+ZF) - Körnermais (+US) - Ackerbohne/Hafer - Winterweizen (+ZF) - Sojabohne - Getreide; (ZF ... Zwischenfrucht; US ... Untersaat)

Der Betriebsleiter setzt verstärkt auf Begrünungsmischungen. Diese werden als Zwischenfrüchte und Untersaaten eingesetzt um die Bodenstruktur, die speziell bei Mais und im Sojabohnenanbau durch die intensive mechanische Beikrautregulierung beeinträchtigt wird, positiv zu beeinflussen. Um das Erosionsrisiko, das der weite Reihenabstand beim Hackfruchtanbau mit sich bringt, zu minimieren, möchte der Landwirt verstärkt winterharte Zwischenfrüchte einsetzen. Die Bodenbearbeitung erfolgt im Betrieb entweder mit Bodenfräse, Flügelschargrubber oder Pflug auf maximal 15 cm Tiefe und wird relativ flexibel, je nach Bodenzustand und Verfügbarkeit, gehandhabt.

## Betrieb 11

Nördliches Waldviertel, Niederösterreich, 478 m Seehöhe

Versuchsbetrieb im Projekt BIOBO; Versuchsthema

Stoppelhobel vs. Grubber

<https://www.bio-austria.at/download/biobo-broschuere/>

**Gemischtbetrieb mit Mutterkuhhaltung und Stiermast;** biologische Wirtschaftsweise, Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung im Jahr 2013 ; 50 ha

**Fruchtfolge 7-jährig:** Luzerne/Rotklee - Luzerne/Rotklee - Triticale - Dinkel (+ZF) - Lupine/Leindotter/Ölleingemenge (+ZF) - Winterweizen (+ZF) - Sommergerste; (ZF ... Zwischenfrucht)

Nach der Umstellung auf die reduzierte Bodenbearbeitung am Betrieb wurde der Boden zuerst hauptsächlich mittels Grubber bearbeitet. Dieses System bewährte sich jedoch nicht, da der Umbruch von Feldfutter zu viele Überfahrten notwendig machte. Daher wurde der Stoppelhobel zusätzlich zum Grubber angeschafft und wird nun vorzugsweise eingesetzt. Der Stoppelhobel ist ein Schälplflug, der eine flache Bodenbearbeitung ermöglicht, üblicherweise mit einer Arbeitstiefe von 5-8 cm, versuchsweise bis zu 15 cm. „Der Stoppelhobel ist ein wertvolles Werkzeug für mich. Er schneidet alles ab, wie z. B. Luzerne, Ampfer, Disteln. Für den Anbau von Blattkräutern und anderen Sonderkulturen ist es wichtig, möglichst wenige Disteln und andere Kulturbegleitpflanzen am Feld zu haben“ erklärt der Landwirt. Als organischer Dünger wird Stallmist ausgebracht, der zusätzlich mit Steinmehl versetzt wird. Bei den Begrünungen setzt er auf vielfältige Mischungen, die er selbst zusammenstellt.

## Betrieb 12

Nördliches Weinviertel, Niederösterreich, 211 m Seehöhe

Versuchsbetrieb im Projekt BIOBO; Versuchsthema  
Begrünungen und zusätzlich Bodenlockerung  
<https://www.bio-austria.at/download/biobo-broschuere/>

**Gemischtbetrieb Ackerbau und Fleischrinderzucht;** biologisch - dynamische Wirtschaftsweise, Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung im Jahr 2000 ; 100 ha

**Fruchtfolge 10-jährig:** Luzerne - Luzerne - Winterweizen (+US+ZF) - Ölkürbis - Winterweizen (+US+ZF) - Ölkürbis - Dinkel (+ZF) - Sonnenblume - Körnerhirse - Roggen; (ZF ... Zwischenfrucht; US ... Untersaat)

Die Betriebsleiterin bewirtschaftet ihren biodynamisch geführten Gemischtbetrieb seit etwa 20 Jahren mit einem nichtwendenden Bodenbearbeitungssystem (Gänsefußschargrubber, mittlere Bearbeitungstiefe 5–10 cm; Fräse 2–5 cm). Seit 2013 setzt die Betriebsleiterin verstärkt Gründungen ein. Meist werden Untersaaten eingesät und nach der Ernte der Hauptfrucht zusätzlich eine Zwischenfrucht mit einer Zinkensämaschine direkt in die bestehende Untersaat ohne vorhergehende Bodenbearbeitung gesät (doppelte Begrünung). Bei den Begrünungen wird viel ausprobiert, als Untersaaten kommen Gräser (Deutsches Weidelgras) im Gemenge mit Kreuzblütlern (Perko, Öllein und Leindotter) zum Einsatz, die danach direkt eingesäten Zwischenfrüchte sind vorzugsweise großkörnige Leguminosen (Bohne, Platterbse, Wicke). Laut Betriebsleiterin sind dadurch die Bodenbearbeitung und Saatbettbereitung im darauffolgenden Frühjahr einfacher, als beim Bestehen lassen der Untersaat.

## Betrieb 13

Mostviertel, Niederösterreich, 862 m Seehöhe

Versuchsbetrieb im Projekt BIOBO; Versuchsthema Bodenlockerung  
<https://www.bio-austria.at/download/biobo-broschuere/>

**Marktfruchtbetrieb mit Veredelung; viehlos;** biologische Wirtschaftsweise, Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung im Jahr 2008 ; 17 ha

**Fruchtfolge 5-jährig:** Ackerbohne - Winterweizen (+ZF) - Körnermais (+ US+ZF) - Leindotter - Dinkel/Roggen/Hanf; (ZF ... Zwischenfrucht; US ... Untersaat)

Der Betrieb war einer der ersten Biobetriebe der Region, hat einen eigenen Hofladen und vermarktet unter anderem vielfach prämiertes Brot. Der Landwirt berichtet, dass er nach der Umstellung auf die biologische Wirtschaftsweise das Bodenbearbeitungssystem zuerst kaum geändert hat und in Abständen weiterhin der Pflug eingesetzt wurde. Seit 2008 kommt ein selbstgebauter Grubber mit wechselbaren Scharen zum Einsatz, welcher nach dem Vorbild des Bodenbearbeitungssystems EcoDyn der Firma Wenz konstruiert wurde. Bis 2013 erfolgte die Bodenbearbeitung sehr flach, es wurde lediglich auf Saattiefe gearbeitet, was jedoch zur Folge hatte, dass in den tieferen Bodenschichten Verdichtungen und weniger Bodenleben festzustellen war. Seither wird mit selbstkonstruierten Schmalscharen mit einer Breite von 1 bis 5 cm nach Bedarf eine Lockerung in 15-18 cm Tiefe durchgeführt. Der Landwirt setzt in seinem Marktfruchtbetrieb bereits seit den 1990er Jahren auf den Einsatz von artenreichen Zwischenfrüchten und Untersaaten, um Boden und Bodenleben zu verbessern und Humus aufzubauen.



## Betrieb 14

Waldviertel, Niederösterreich, 572m Seehöhe

Versuchsbetrieb im Projekt BIOBO; Versuchsthema

Dammkultur nach Turiel-Major

<https://www.bio-austria.at/download/biobo-broschuere/>

**Gemischtbetrieb mit Mutterkuhhaltung;** biologische Wirtschaftsweise, Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung im Jahr 2002 ; 50 ha

**Fruchtfolge 6-jährig:** Rotklee gras - Roggen/Triticale (+ZF) - Erbse (+ZF) - Kartoffel - Dinkel (+ ZF) - Mais; (ZF ... Zwischenfrucht)

Der Landwirt begann im Jahr 2000 ausgewählte Flächen pfluglos zu bewirtschaften. Das Credo bei der Bodenbearbeitung lautet seitdem „seicht wendend, tief lockernd“. Bisher wurde am Betrieb eine Festbodenwirtschaft betrieben, die mit einem Flachgrubber (Eco-Dyn) und einer Fräse umgesetzt wurde. Ergänzt wurde die Bearbeitung durch eine regelmäßige möglichst schonende Tiefenlockerung bis 20 cm mit einem Grubber. Bis auf die Kartoffel wurden alle Kulturen auf einem flachen und festen Ackerboden kultiviert. Der Kartoffelanbau erfolgte in diesem System herkömmlich mit Dämmen. Die Bodenbearbeitung, die Dammformung und die Pflegemaßnahmen und die dafür eingesetzten Geräte unterscheiden sich jedoch grundsätzlich zum Dammkultursystem nach Turiel-Major. Der Landwirt verwendete in seinem Gemischtbetrieb mit Mutterkühen bis zur Umstellung auf das Dammkultursystem im Jahr 2016 Untersaaten, da der Zeitraum für eine Stoppelsaat von Zwischenfrüchten in seiner Region oft zu kurz ist. Seit 2015 setzt der Betriebsleiter auf ein niedrigwüchsiges Klee gras, sodass nach der Ernte jeder Kultur eine Wiese am Acker steht. Die Umstellung auf das Dammkultursystem hat auch eine Umstellung der Begrünungen nach sich gezogen. Anstelle der Untersaaten werden jetzt Zwischenfrüchte eingesetzt, die doppelt gesät werden. Die erste Saat erfolgt nach der Getreideernte, die zweite Saat bevor die Zwischenfrucht in die generative Phase kommt. Zudem achtet der Betriebsleiter darauf, dass die Zwischenfrüchte winterhart sind, denn ihm zufolge werden dadurch die Bodenorganismen besser mit Nährstoffen versorgt. Darüber hinaus beobachtete der Betriebsleiter eine stärkere Wirkung auf die Verbesserung der Bodenstruktur bei Klee gras als bei reinem Klee. Den Vorteil im doppelten Zwischenfruchtanbau sieht der Landwirt darin, dass sich die Bodenstruktur viel besser und schneller aufbaut, die Qualität und Erträge der Kulturpflanzen werden höher. Laut ihm investiert die Pflanze in der vegetativen Phase in die Wurzeln und durch die Wurzelexsudate wird die Krümelstruktur im Boden verbessert. In der generativen Phase gehen diese Investitionen weg von der Wurzel in die generativen Teile. Das vorrangige Ziel des Betriebsleiters ist es, das Bodenleben und die Bodenbiologie zu stärken. Die Bodenbearbeitung wird dementsprechend optimiert. Seit der Umstellung auf das Dammsystem gelten noch dieselben Prinzipien, jedoch die Technik hat sich geändert und ist präziser geworden, sodass nun auch schwerer zu betreuende Kulturen angebaut werden können, wie z. B. Mais oder Kümmel. Als Herausforderung bei der reduzierten Bodenbearbeitung sieht der Landwirt die Kunst einen Kulturwechsel ohne Unkräuter zu schaffen. Wobei die Frage, ob das Dammkultursystem nach Turiel-Major als reduziertes oder intensives Bodenbearbeitungsverfahren gilt, bisher nicht eindeutig geklärt werden konnte. Der Mist aus der Rinderhaltung wird meist auf die Gründüngung relativ frisch, also wenig verrottet, ausgebracht und nicht eingearbeitet, sondern an der Bodenoberfläche belassen.

## Betrieb 15

Tullnerfeld, Niederösterreich, 575 m Seehöhe

Versuchsbetrieb im Projekt BIOBO; Versuchsthema  
Direktsaat von Sojabohne in eine gewalzte Zwischenfrucht  
<https://www.bio-austria.at/download/biobo-broschuere/>

**Marktfruchtbetrieb;** Forschungs- und Demonstrationsbauernhof, biologische Wirtschaftsweise, Umstellung auf reduzierte Bodenbearbeitung im Jahr 1995 ; 96 ha

**Fruchtfolge 8-jährig:** Luzerne - Luzerne - Winterweizen (+ZF) - Körnermais - Hanf (+ZF) - Sojabohne (+ZF) - Sojabohne - Sommergerste; (ZF ... Zwischenfrucht)

Seit etwa 20 Jahren wird der Betrieb im Tullnerfeld vieh- und pfluglos bewirtschaftet, was auch nach der Umstellung auf die biologische Landwirtschaft im Jahr 2006 so beibehalten wurde. Die Betriebszweige umfassen einerseits den Ackerbau, andererseits die Erzeugung und den Verkauf von Wurmkompost und Pflanzsubstraten. Der Landwirt ist aufgeschlossen, immer neugierig und probiert gerne aus. So ist sein Betrieb ein Forschungs- und Demonstrationsbauernhof und es bestehen Kooperationen mit in- und ausländischen Forschungsinstituten. Auch bei seinen Versuchen zur biologischen Direktsaat und zu Agroforstsystemen ist sein Ziel, Neues zu testen und nachhaltigere Bewirtschaftungsmethoden zu etablieren. Gründüngungen mit artenreichen Zwischenfruchtmischungen waren immer wichtig in seinem Anbausystem, vor allem seit dem Umstieg auf die biologische Wirtschaftsweise. Als Folge davon konnte der Betriebsleiter eine Steigerung der Widerstandsfähigkeit des Bodens gegenüber biotischen und abiotischen Schadfaktoren beobachten. Nach 15 Jahren reduzierter Bodenbearbeitung ausschließlich mit dem 2-balkigen Flügelschargrubber kam es zu Problemen mit Bodenverdichtungen, Ertragsschwankungen und Verunkrautung mit Distel. Daher setzt der Landwirt seit 2014 bei der Bodenbearbeitung auf einen Präzisionsgrubber, welcher speziell für geringe Arbeitstiefen von 2-5 cm konstruiert wurde. Die Biomasse bleibt oberflächlich liegen und wirkt wie eine Mulchschicht. Durch Gänsefußschare wird ein ganzflächiger Schnitt gewährleistet. Meist werden mehrere Überfahrten benötigt, um beispielsweise Luzerne vollständig umzubrechen. Optional wird der Grubber auch mit Meißelscharen ausgerüstet, welche bei Bedarf für eine tiefere Lockerung auf 10-12 cm eingesetzt werden. 2016 startete der Landwirt seine ersten Versuche zur Bearbeitung von Zwischenfrüchten mit der Messerwalze und zeitgleicher Direktsaat von Hauptkulturen, ohne jegliche weitere Bodenbearbeitung.

## Betriebe NÖ Agrarbezirksbehörde:

Bei den folgenden „Best Practice Beispiel“ Betrieben für klimangepasste und bodenaufbauende Landwirtschaft konnte insbesondere in den tierhaltende- und Bio-Betrieben eine positive Humusbilanzierung festgestellt werden (Kolbe, 2007). Viehlose Ackerbaubetriebe dagegen deckten ihren Wirtschaftsdüngerbedarf mit Biogasgülle bzw. Kompost aus nahe gelegenen Biogas- bzw. Kompostierungsanlage.

### Betrieb 16

Niederösterreich - Mitte, 287 m ü.A.,  
Hauptproduktionsgebiet: Alpenvorland, Kleinproduktionsgebiet: Wieselburg - St. Pöltner Gebiet

**Bio-Betrieb mit Schweinezucht und -mast sowie Marktfruchtanbau;** Betriebsgröße: 75 ha, Viehstand: 70 Zuchtsauen, 20 Jungsauen, 1.000 Ferkel pro Jahr, 1.600 Mastschweine pro Jahr

#### Fruchtfolgen:

Soja - Winterweizen - Sonnenblume - Triticale/Erbsengemenge - Wintergerste  
Ackerbohnen/Hafergemenge - Winterweizen, Triticale/Erbsengemenge - Wintergerste  
Winterweizen/Ackerbohne - Triticale - Triticale/Erbsengemenge - Triticale –  
Sonnenblume - Triticale/Erbsengemenge - Winterweizen - Wintergerste

**Besonderheiten des Betriebs:** In jeder Fruchtfolge werden Körnerleguminosen angebaut.

Der Humusaufbau erfolgt u. a. durch intensiven Zwischenfruchtanbau: nach jedem Getreide erfolgt eine Begrünung mit Grünschnittroggen und Kleeuntersaat. Das Stroh wird zum Teil eingearbeitet bzw. kommt als Stallmist wieder auf die Flächen. Auf hofnahen Ackerflächen wird zusätzlich Jauche oder Kompost ausgebracht. Zukünftig soll der Mist differenzierter ausgebracht werden: auf Flächen der Standortgruppe 2 (nach Kolbe) weniger, dafür auf Flächen der Standortgruppe 5 und vor allem der Standortgruppe 6 mehr Mist.

### Betrieb 17

Niederösterreich Mitte, 221 m ü. A.  
Hauptproduktionsgebiet: Alpenvorland, Kleinproduktionsgebiet: Wieselburg - St. Pöltner Gebiet

**Konventioneller Marktfruchtbetrieb mit abwechslungsreicher Nutztierhaltung:** Mutterkühe, Schweine, Hühner, Schafe und Pferde; Betriebsgröße: 44 ha, Viehstand: 15 Mutterkühe, 25 Kälber, 2 Sauen, 1 Eber, 25 Mastschweine, 30 Legehennen, 200 Masthühner, 5 Mutterschafe, 4 Pferde

#### Fruchtfolgen (Auswahl):

Körnermais - Winterweizen - Wintergerste - Körnermais - Winterweizen - Triticale  
Ackerbohne - Körnermais - Winterweizen - Körnermais - Winterweizen - Wintergerste  
Körnermais - Winterweizen - Soja - Körnermais - Winterweizen - Wintergerste  
Winterroggen - Körnermais - Winterweizen - Wintergerste - Klee gras (3-jährig)

**Besonderheiten des Betriebs:** Nur aufgrund fehlender, hofnaher Weideflächen ist der Betrieb nicht Bio-zertifiziert. Der Humusaufbau erfolgt durch intensiven Zwischenfruchtanbau (Grünschnittroggen vor Körnermais), auf den „schlechteren“ Äckern wird Klee gras angebaut, zukünftig soll auf allen Flächen 1 x in der Fruchtfolge Klee gras angebaut werden. Auf einem Teil der Ackerflächen werden Körnerleguminosen kultiviert (Soja oder Ackerbohne); geplant ist, anstelle von Soja vermehrt auf Ackerbohnen-Hafer-Gemenge zu setzen. Das Getreidestroh wird zwar abgeführt, kommt aber als Stallmist wieder zurück auf die Flächen. Zusätzlich wird Biogasgülle aus der nahe gelegenen Biogasanlage ausgebracht. Es wird hoher Wert auf das Schließen von Kreisläufen gelegt, ein großer Vorteil ist, dass die Futtermittel zum Großteil selbst produziert werden und kaum Kraftfutter zugekauft werden muss.

### Betrieb 18

Niederösterreich Mitte, 221 m ü. A.

Hauptproduktionsgebiet: Alpenvorland, Kleinproduktionsgebiet: Wieselburg - St. Pöltener Gebiet

**Konventioneller Marktfruchtbetrieb mit Rindermast;** Betriebsgröße: 67 ha, Viehstand: 144 Stierkälber, 70 Jungtiere

**Fruchtfolgen (Auswahl):**

Winterweizen - Körnermais - Winterweizen - Körnermais - Rübensamenvermehrung

Körnermais - Winterweizen

Winterweizen - Rübensamenvermehrung - Silomais - Winterweizen - Silomais - Rübensamenvermehrung

**Besonderheiten des Betriebs:** Trotz der relativ intensiven Fruchtfolgen mit vielen Hackfrüchten wird aufgrund des intensiven Zwischenfruchtanbaus (Senf, Phacelia, Ölrettich und Leindotter jeweils vor Silomais oder Körnermais) Humus aufgebaut. Das Getreidestroh wird eingearbeitet bzw. kommt als Stallmist wieder zurück auf die Flächen. Neben dem Stallmist wird auch Rindergülle aufgebracht. Die Zufuhr von Kompost aus der nahe gelegenen Kompostierungsanlage würde die Humusbilanz weiter positiv beeinflussen.

### Betrieb 19

Niederösterreich - Mitte, 240 m ü. A.

Hauptproduktionsgebiet: Alpenvorland, Kleinproduktionsgebiet: Wieselburg - St. Pöltener Gebiet

**Konventioneller Marktfruchtbetrieb mit Rindermast;** Betriebsgröße: 52 ha, Viehstand: 90 Stierkälber, 45 Jungtiere

**Fruchtfolgen (Auswahl):**

Körnermais - Winterweizen - Körnermais - Hafer - Körnermais - Winterweizen - Luzerne (4-jährig)

Winterweizen - Körnermais

Erbse - Silomais - Winterweizen - Silomais - Wintergerste/Winterweizen - Silomais

Wechselwiese (5-jährig) - Winterweizen - Winterroggen - Wintergerste

**Besonderheiten des Betriebs:** Humusaufbau durch intensiven Zwischenfruchtanbau (jeweils vor Silomais und vor Körnermais). In die meisten Fruchtfolgen werden Leguminosen gebaut (Futter- oder Körnerleguminosen), jedes 2. Jahr wird Stallmist der Rinder bzw. auch zugekaufter Pferdemist ausgebracht. Die Rindergülle wird hauptsächlich auf die Ackerflächen ausgebracht, nur ein kleiner Anteil kommt auf die Grünlandflächen. Geplant ist, den Körner- und den Silomais abwechselnd anzubauen, damit verstärkt Ernterückstände auf den Flächen bleiben. Das dadurch fehlende Kraftfutter für die Rinder könnte durch winterharte Zwischenbegrünung (z. B. Landsberger Gemenge) ausgeglichen werden.

## Humuszentrum LK Steiermark

### Betrieb 20

8543 St. Martin im Sulmtal, Steiermark

**Kurzbeschreibung des Betriebs:** Konventioneller Ackerbau mit Direktvermarktung, 12 ha Eigengrund

**Fruchtfolgen:** Ölkürbis, Körnermais und Soja.

**Besonderheiten des Betriebs:** Wir legen großen Wert auf Bodenfruchtbarkeit und eine Düngung unter Berücksichtigung der Kationenaustauschkapazität, was auch eine spezielle Bodenprobe erfordert. (Albrecht/Kinsey)  
Pfluglose Bodenbearbeitung seit über 15 Jahren, seit drei Jahren auf einem Teil auch Direktsaat mit sehr guten Erfolgen. Wir legen sehr hohen Wert auf eine ständige Bodenbedeckung mit einer der Situation angepassten Mischung aus winterharten Zwischenfrüchten, wenn möglich auf 100 % der Ackerfläche.  
Da aufgrund vom langjährigen Pflugverzicht sich eine andere Bodenbiologie eingestellt hat und 2019 mit der Direktsaat von Mais sogar einen Ertrag von 15,8t/ha (trocken) erreicht werden konnte, wurde auch der Versuch gestartet, Ölkürbis in Direktsaat nach Körnermais anzubauen.

#### Betrieb 21

8342 Gnas, Steiermark

**Kurzbeschreibung des Betriebs:** ca. 50 ha Ackerbau konventionell, 4.500 Legehennen, Zukauf von Biogasgülle zum Vermischen mit Hühnermist, Ausbringung mit Schleppschlauch

**Fruchtfolge:** 75 % Mais 20 % Getreide 5 % Kürbis oder Soja

**Besonderheiten des Betriebs:** Nach abfrostender Begrünung (2 kg Gelbsenf, 1 kg Phazelia, 1 kg Mungo, 1 kg Ölrettich, 15 kg Buchweizen) wird darauffolgend Mais in Mulchsaat angebaut. Die abgeernteten Maisfelder werden zum Großteil gegrubbert und winterhart (Perko) eingesät. Bei abschwemmungsgefährdeten Flächen wird mit dem Düngerstreuer 60 kg Wintergerste ganzflächig vor dem Maisanbau ausgesät. Gerste deswegen, weil sie am schnellsten bestockt und sehr gut zu bekämpfen ist. Wichtig ist dabei mit der Spritzung so lange wie möglich zuzuwarten, um einen guten Anwuchs der Gerste zu erreichen. Vor dem Getreideanbau werden nur die oberen Randstreifen der Felder nach oben gepflügt, um zu verhindern das am oberen Rand der Felder die fruchtbare Erde immer weiter nach unten wandert. Der Rest wird gegrubbert.

#### Betrieb 22

8274 Buch, Steiermark

**Kurzbeschreibung des Betriebs:** Konventionelle Legehennenhaltung in Boden-& Freilandhaltung mit Direktvermarktung;

**Fruchtfolge:** Körnermais - Soja - Weizen - Körnermais

**Besonderheiten des Betriebs:** Seit 2016 werden 85 % der Fläche pfluglos bewirtschaftet. Hauptgrund war die Erosion auf den Hangflächen und um Humusaufbau zu forcieren. Es wird intensiver Zwischenfruchtanbau forciert. Eigene Mischungen mit bis zu 24 Partnern werden eingesetzt, um die Mykorrhiza Pilze im Boden zu fördern und so die Bodenfruchtbarkeit zu heben. Seit 2018 wird bei uns am Betrieb nach dem Kinsey System gearbeitet. Wir versuchen den Boden und nicht die Pflanze zu düngen. Ein optimal eingestellter Boden bringt vor allem in schwierigen Jahren (Hitze, Trockenstress, aber auch bei hohen Niederschlagsmengen) deutliche Vorteile. Bodenbearbeitung läuft bei uns nach dem Prinzip: So seicht und wenig wie möglich. Dies kann von Jahr zu Jahr sehr unterschiedlich sein.

#### Betrieb 23

8480 Mureck, Steiermark

**Kurzbeschreibung des Betriebes:** Konventioneller Ackerbau 40 ha, Schweinemast, Biogasanlage

**Fruchtfolge:** C CM Mais, Winterraps, Winterweizen, Ölkürbis

**Besonderheiten des Betriebs:** Nach Winterraps, Winterweizen und Ölkürbis wird seit über 15 Jahren eine Begrünung mit Grubber angelegt. Der darauffolgende Mais wird mittels Mulchsaat angebaut. Die Humusgehalte konnten durch die Fruchtfolge und Begrünung um 0,5 bis 1 % angehoben werden. Leider ist in unserem Gebiet eine Düngung der Begrünungen nicht mehr erlaubt, was sich negativ auf die Massebildung auswirkt. Gedüngt wird zum großen Teil Biogasgülle, es wird nur Stickstoff und Phosphor ergänzt.

## 6 Resümee

Die Bedeutung der Themen Bodenfruchtbarkeit und Humus ist in den letzten Jahren aus verschiedenen Gründen verstärkt in den Fokus gerückt. Durch die bereits spürbaren Auswirkungen des Klimawandels auf die landwirtschaftliche Produktion ist es erforderlich, neue Strategien zu entwickeln, um die Bodenfruchtbarkeit auch unter geänderten Rahmenbedingungen aufrechtzuerhalten. Durch Humuserhaltung und Humusaufbau ist es möglich, die Bodenfruchtbarkeit im Sinne einer Anpassung an die Folgen des Klimawandels zu erhalten oder zu steigern und damit durch die langfristige Kohlenstoffspeicherung im Boden auch zum Klimaschutz beizutragen. Um den Klimawandel einzudämmen, müssen die Emissionen aber grundsätzlich in allen Sektoren reduziert werden.

Das Thema Humus wird in der vorliegenden Broschüre unter Verwendung sämtlicher Informationen, die aktuell zu diesem Thema zur Verfügung stehen, sowohl für die Praxis als auch für die Verwaltung umfassend dargestellt. Nach einer Einführung zum Thema Humus werden verschiedene humusfördernde Maßnahmen inkl. des auf wissenschaftlichen Studien beruhenden Potenzials dieser Maßnahmen hinsichtlich einer Humussteigerung dargestellt. Danach wird darauf eingegangen, wie Humus bzw. Humusveränderungen festgestellt werden können. Weiters werden verschiedene Förder- und Unterstützungsmöglichkeiten und Initiativen sowohl im privaten als auch im öffentlichen Bereich aufgezeigt. Ein ganz wichtiger Teil der Broschüre ist auch die Vorstellung von Best Practice Betrieben aus verschiedenen Regionen Österreichs, um die Vielfalt des Umgangs mit dem Thema Bodenfruchtbarkeit aufzuzeigen.

Sowohl auf EU-Ebene als auch auf nationaler Ebene gibt es zahlreiche Vorschläge und Ideen über den künftigen Umgang mit diesem Thema. In der neuen GAP wird das Thema Bodenschutz sowohl in der ersten als auch in der zweiten Säule eine ebenso wichtige Rolle spielen wie in der EU-Klimapolitik. Unter Carbon Farming wird von der Europäischen Kommission verstanden, dass Landwirt:innen Geld dafür erhalten können, wenn nachweislich zusätzlicher Bodenkohlenstoff auf den Flächen gebunden werden kann. Die Europäische Kommission wird dazu bis Ende 2022 einen Vorschlag für Regeln vorlegen, nach denen diese Vergütung ablaufen soll. Auf privatwirtschaftlicher Ebene gibt es jedenfalls bereits Bodenkohlenstoffzertifizierungssysteme, an denen die Landwirt:innen teilnehmen können. Diese sind allerdings hinsichtlich der Nachweise und Überwachung mit relativ großen Unsicherheiten für

die Landwirt:innen behaftet. Bodenkohlenstoffspeicherung in Böden spielt nach der Vorstellung der Europäischen Kommission in der EU-Klimapolitik künftig eine große Rolle im Hinblick auf die Erreichung der Klimaneutralität. Die Erwartungen an den Beitrag des Bodenkohlenstoffs zum Klimaschutz sind hoch, aber ob sie gerechtfertigt sind, wird sich erst zeigen. Einerseits hat auch der Klimawandel selbst einen Einfluss auf die Bodenfruchtbarkeit und den Humusgehalt und außerdem ist es fraglich, ob auf EU-Ebene ausreichend genaue Daten vorliegen, um ein realistisches Speicherpotenzial auf EU-Ebene festlegen zu können. In Österreich laufen derzeit Forschungsprojekte, die sich mit dem Thema des zusätzlichen möglichen Speicherpotenzials beschäftigen. Solche Potenziale müssen immer unter der Prämisse einer produzierenden Landwirtschaft erstellt werden, die auch künftig die Ernährungssicherung gewährleisten können muss.

Sowohl auf nationaler/regionaler als auch auf EU-Ebene wurden in den letzten Jahren verstärkt Aktivitäten gesetzt (z. B. Förderung, Forschung, Bildung, Beratung, Zertifizierungssysteme), in denen das Thema Humus zu Recht in den Vordergrund gerückt wurde. Um die Herausforderungen, vor denen die Landwirt:innen angesichts des Klimawandels stehen, bewältigen zu können, ist jedenfalls eine weitere intensive Zusammenarbeit zwischen Forschung, Verwaltung und Praxis erforderlich. Schon jetzt werden von den Landwirt:innen zahlreiche an ihren Betrieb angepasste Maßnahmen gesetzt, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und wenn möglich auch zu steigern. Dieser Erfolg konnte im Rahmen der Evaluierung der ÖPUL-Maßnahmen nachgewiesen werden. Die Entscheidung über die Teilnahme an einem Zertifizierungssystem kann nur einzelbetrieblich faktenbasiert unter Berücksichtigung der jeweiligen Ausgangslage und der Unsicherheiten entschieden werden, auf welche in der vorliegenden Broschüre hingewiesen wird. Ob die zum Teil sehr hohen Erwartungen auf EU-Ebene an den Beitrag von Humussteigerungen auf landwirtschaftlichen Flächen zum Klimaschutz realistisch sind, muss ebenfalls faktenbasiert und unter Einbeziehung der relevanten wissenschaftlichen Erkenntnisse sowie von Klimamodellierungen noch intensiv diskutiert werden. Aufgrund der aktuellen Energiekrise steigt der Druck auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen, neben der zu priorisierenden Nahrungs- und Futtermittel-Produktion auch Energie (Holz, Biomasse, Photovoltaik) zu erzeugen. In diesem Zusammenhang muss darauf hingewiesen werden, dass sich Energieproduktion und Humusaufbau bzw. Humuserhalt in vielen Fällen nicht vereinbaren lassen.

Zusammenfassend wird festgehalten, dass das Thema Humus in der österreichischen Landwirtschaft sehr ernst genommen wird. Die Herausforderung für die Zukunft besteht nun darin, auf Basis der bereits erzielten Erfolge die Bodenfruchtbarkeit auch unter geänderten Klimabedingungen aufrecht zu erhalten und diese, dort wo es möglich ist, auch noch zu steigern.

# 7 Anhang

## (Daten/Hintergrundinformationen)

### 7.1 Ausführliche Erläuterung zu den Humuspools

**Mineral-assoziiertes (Schluff/Ton-gebundener) Humuspool:** Der langfristig an Mineraloberflächen stabilisierte Humus mit mittleren Verweilzeiten von über 1000 Jahren ist zum Großteil mikrobiellen Ursprungs. Er besteht also aus mikrobiellen Ausscheidungen oder mikrobieller Nekromasse. Dieser mikrobielle in vivo Pfad der Bildung von mineral-assoziierten organischer Substanz ist dort dominant, wo sich im Boden Zonen mikrobieller Häufung befinden, wie zum Beispiel in der Rhizosphäre und der Detritosphäre. Dementsprechend ist ein möglichst dauerhafter Bewuchs mit Pflanzen entscheidend für den Aufbau des mineral-assoziierten Pools, da wachsende Pflanzen über die Wurzeln eine ständige Nahrung für starkes mikrobielles Wachstum bereitstellen. Während einfache ungeladene Zucker vorzugsweise von Bodenmikroorganismen verstoffwechselt werden und damit im in-vivo mikrobiellen Pfad landen, trägt auch die Sorption gelöster polarer organischer Stoffe (z. B. organische Säuren) an die Oberflächen von Tonmineralen und (Hydr-) Oxiden zur Bildung des stabilisierten, mineral-assoziierten Humus bei. Diese Stoffe können sowohl über Wurzel-exsudate als auch durch den Abbau von oberirdischen Pflanzenteilen in den Boden gelangen. Sie sind jedoch mengenmäßig weniger bedeutend als der direkte Beitrag von Mikroorganismen zum mineral-assoziierten Humuspool (Sokol et al., 2019). Während der biologische Aspekt des mineral-assoziierten Humuspools durch die Bewirtschaftung beeinflussbar ist (z. B. durch Dauer und Art des Bewuchses, Ausmaß der Durchwurzelung, Aktivität und Häufigkeit von Mikroorganismen) ist seine Größe auch von Eigenschaften abhängig, die sich aus der Bodenbildung ergeben und daher nicht veränderbar sind (z. B. Tongehalt, Tonmineralogie, Eisenoxide). Dementsprechend kann dieser Pool vor allem im Oberboden auch abgesättigt werden.

**Aggregat-assoziiertes Humuspool:** Eine weitere Bedeutung der Wurzeln für den Humusaufbau liegt in ihrer wesentlichen Rolle bei der Bodenstrukturbildung. Die Bildung von Aggregaten ist insbesondere durch die physikalische Stabilisierung von teilweise zersetzter, partikulärer organischer Substanz (POM) ein wichtiger Einflussfaktor für den Humusaufbau. Der Einschluss dieser POM-Reste in Bodenaggregaten führt zu einer räumlichen Trennung



zwischen partikulärer organischer Substanz und abbauenden Mikroorganismen und verlangsamt so eine weitere mikrobielle Zersetzung (mittlere Verweilzeit des organischen Kohlenstoffs ca. 10-500 Jahre). Insbesondere von Bedeutung sind dabei Makroaggregate sowie die diese aufbauenden stabilen Mikroaggregate, die in den größeren Strukturen um den POM-Kern entstehen (Six et al., 2000). Da Wurzeln sowohl zur Stabilisierung von organischer Substanz im mineral-assoziierten Pool als auch direkt zur physikalischen Stabilisierung von Humus im aggregat-assoziierten Pool beitragen, wird der gesamte Wurzelbeitrag zur Bildung von stabilisiertem Humus auf ca. 46 % des Gesamteintrags an organischer Substanz geschätzt. Der Beitrag der oberirdischen Pflanzenteile wird dagegen nur mit ca. 8 % veranschlagt (Jackson et al., 2017).

**Ungeschützter Humuspool:** Der ungeschützte Humuspool besteht aus frei im Boden vorliegenden, biochemisch schwer abbaubaren POM-Resten (fPOM, „free POM“). Diese weisen ein weiteres C/N-Verhältnis im Vergleich zu Bodenmikroorganismen (Zechmeister et al. 2015) sowie einen komplexeren chemischen Aufbau auf. Für den mikrobiellen Abbau sind daher weitere N- und C-Quellen notwendig, welche weitere Nährstoffe liefern. Die Stabilität dieses Pools wird also durch seine schwerere Abbaubarkeit begründet (mittlere Verweilzeit des organischen Kohlenstoffs 1-10 Jahre). Dennoch wird dieser freie Humus im Boden wesentlich schneller umgesetzt als jener Humus, der durch Wechselwirkungen mit der Mineralphase im Ökosystem Boden stabilisiert wird (mittlere Verweilzeit ca. < 10 Jahre). Hier gilt häufig auch, dass sich biochemisch schwer abbaubare Humus-fPOM-Bestandteile im Boden anreichern, wenn die Mikroorganismengemeinschaften ausreichend mit biochemisch leichter abbaubaren organischen Substanzen wie Zuckern, organischen Säuren oder Aminosäuren versorgt sind.

Die Größen dieser drei Humuspools variieren zwischen verschiedenen Böden. Bei Schwarzerde in Ostösterreich etwa lag der Schluff/Ton-gebundene Pool bei ca. 50-60 %, der Aggregat-Pool bei 30-45 % während die ungeschützt vorliegende POM-Fraktion nur ca. 3-5 % ausmachte (Sandén et al., 2017). Für Bayern zeigte sich, dass in Ackeroberböden weniger Humus im ungeschützten Pool und in den Aggregaten vorliegt als unter Wald oder unter Grünland (Wiesmeier et al., 2014). Das legt den Schluss nahe, dass eine Anreicherung von Humus unter Acker vor allem als partikuläre organische Substanz und in Bodenaggregaten Erfolg haben kann. Dennoch ist zu bedenken, dass Untersuchungen aus Frankreich auch ein Kohlenstoffsättigungsdefizit am mineral-assoziierten Pool bei Ackerböden zeigen (Angers et al., 2011) und dieser die höchste Stabilität aufweist. Gleichzeitig ist klar, dass die Stabilisierung dieses zusätzlich gespeicherten Humus durch humuszehrende Bewirtschaftung auch wieder

rückgängig gemacht werden kann (z. B. Aggregatzerstörung durch intensive Bodenbearbeitung). Es braucht jedoch noch mehr Daten zu Poolgrößen und Sättigungsdefiziten in Ackerböden, um erfolgreiche Managementstrategien für den nachhaltigen Aufbau von stabilisiertem Humus zu entwerfen.

### **Pool-orientierte Humusanalytik**

Die Bedeutung der oben abgebildeten drei wesentlichen Pools sollte auch in der Analytik zunehmend Berücksichtigung finden. Angelehnt an die Untersuchungen von Wiesmeier et al. (2014) wäre eine bessere Kenntnis der Größen der verschiedenen Humuspools (Mineral-assoziiert, Aggregat-assoziiert, freiliegend) in verschiedenen Böden von zentraler Bedeutung. Durch die stetig wachsenden Erkenntnisse der pool-spezifischen Mechanismen des Humusaufbaus kann eine solche Datengrundlage wichtige Hinweise bringen, welche Bewirtschaftungsmaßnahmen zu effizientem, langfristigem Humusaufbau im Ackerbau führen können. Basierend auf einem kürzlich veröffentlichten Methodenvergleich, erscheint eine fraktionierte Analyse der Humuspools nach der modifizierten Methode von Zimmermann et al. (2007) am vielversprechendsten (Poeplau et al. 2018, siehe auch [www.somfractionation.org](http://www.somfractionation.org)). Eine vereinfachte Analytik auf Grundlage von Größenfraktionierung bei 53 µm wurde jüngst von Lavalley et al. (2020) vorgeschlagen und kann als Orientierung beim Aufbau einer entsprechenden Datenbasis für die analytische Begleitung von Humusaufbaustrategien im Ackerbau dienen. Die Untersuchung von Biomarkern in Bodenproben bietet darüber hinaus die Möglichkeit, die Bildungspfade (siehe Abb. 2; z. B. in-vivo, direkte Sorption) und Quellen (Pilze, Bakterien, Wurzeln) des Kohlenstoffs zu bestimmen und damit gezielt die Wirkung von Bewirtschaftungsmaßnahmen zu erfassen.

## **7.2 Biokohle**

### **7.2.1 Biokohle und organischer Kohlenstoff im Boden**

Dem organischen Material im Boden (SOM) verdanken wir eine breite Palette von Bodenfunktionen und Ökosystem-Dienstleistungen. Um die positiven Wirkungen der Bodenorganik zu stärken, wurden verschiedene Empfehlungen entwickelt, welche die Anreicherung von organischem Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) im Boden zum Ziel haben. Einige dieser Strategien beruhen auf der Zufuhr von organischen Düngern oder Bodenhilfsstoffen. Die am häufigsten ausgebrachten organischen Materialien wie Wirtschaftsdünger oder Kompost reichern den

Boden je nach Bodenart, Klimabedingungen und Bodenmanagement nur mit etwa 0,20 – 0,26 kg Kohlenstoff pro kg ausgebrachtem Material an (EIP-AGRI, 2019)<sup>1</sup>. Alternative Bodenhilfsstoffe mit hohen Kohlenstoffgehalten könnten diesen Anteil jedoch wesentlich schneller erhöhen.

Für diesen Zweck erscheint Biokohle mit einem Kohlenstoffgehalt von 50-90 % auf den ersten Blick als attraktive Alternative. Biokohle ist das feste Produkt der thermochemischen Umwandlung von Biomasse in Sauerstoff-limitierter Umgebung (= Pyrolyse) und hat Kohlenstoff großteils in aromatischen Verbindungen und funktionellen Gruppen eingebaut. Nachfolgend wird daher die Rolle von Biokohle bei der Erhöhung des organischen Kohlenstoffs im Boden, die sich daraus ergebenden Potenziale und Limitierungen sowie die Wechselwirkungen mit der schon vorhandenen bodenorganischen Substanz beleuchtet.

### **7.2.2 Biokohle als spezielle Form der organischen Masse im Boden**

Organischer Kohlenstoff ( $C_{org}$ ) macht etwa 58 % des organischen Materials im Boden aus. Diese Fraktion unterstützt die Nährstoffversorgung von Pflanzen und Mikroorganismen sowie die Kohlenstoff-Speicherung, was die wichtige Rolle des Bodenkompartment im Kampf gegen den Klimawandel zur Folge hat. Biokohle, wenngleich zu mehr als der Hälfte (bis zu 90 %) aus organischem Kohlenstoff bestehend, unterscheidet sich jedoch stark von der sonstigen im Boden vorhandenen SOM.

Die Struktur von Biokohle hängt zu einem wesentlichen Teil von der Art des Ausgangsmaterials und von der Pyrolyse-Temperatur ab. Bei pflanzlichen Ausgangsstoffen bleibt die ursprüngliche Porenstruktur der Leitgefäße während der Pyrolyse erhalten, wird jedoch durch ein Netz von feineren Poren im Submikron-Maßstab ergänzt und miteinander verbunden (Chia et al., 2015). Im Zuge der thermochemischen Umwandlung werden im Temperaturbereich 220-400 °C die Hemizellulose- und Zellulosebestandteile des Pflanzenmaterials abgebaut (Yang et al., 2007), sodass die mineralischen Bestandteile und Lignin als Grundgerüst der Biokohle-Struktur überbleiben. Je nach Aufheizgeschwindigkeit und dem Vorhandensein von mikrokristallinen Strukturen entstehen während der pyrolytischen Karbonisierung aromatische Strukturen, welche Amorph bis Graphit ähnlich angeordnet sein können (Abbildung 23). Je höher die Pyrolyse-Temperatur, umso graphitähnlicher werden die Strukturen,

---

<sup>1</sup> EIP-AGRI Focus Group: Moving from source to sink in arable farming. Final Report, 2019. Brussels, Belgium.

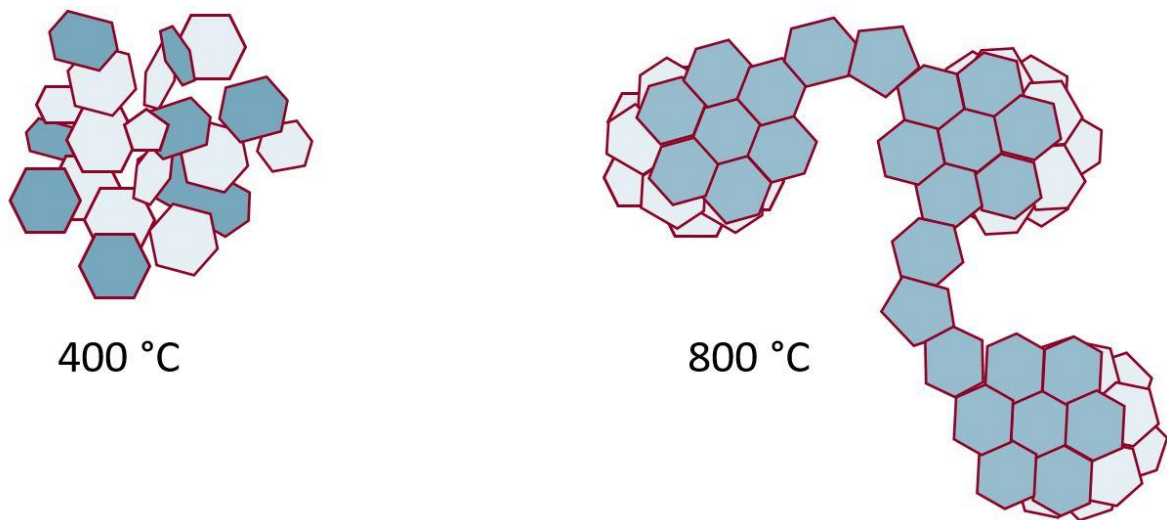
erreichen jedoch im typischen Bereich der Pyrolyse-Temperaturen noch nicht den hohen Ordnungsgrad in allen drei Dimensionen, der für Graphit typisch ist.

Je höher der Ordnungsgrad und der Kondensationsgrad der aromatischen Strukturen, umso schwieriger wird es für Mikroorganismen, das Gerüst als Kohlenstoffquelle zu verwenden. Allerdings ist Biokohle kein homogenes Material, sondern besteht in jedem Partikel aus Kohlenstoffgerüsten teils mit niedrigem, teils mit hohem Kondensationsgrad. Entsprechend unterschiedlich zugänglich sind diese Fraktionen zur Nutzung durch Mikroorganismen. Zusätzlich können sich an den Oberflächen der Biokohlen kleinmolekulare Kohlenwasserstoffe durch Kondensation flüchtiger Bestandteile während oder nach der Pyrolyse absetzen, welche für Mikroorganismen eine gut zugängliche Kohlenstoffquelle darstellen. Dies kann die natürliche Besiedlung von Biokohle mit Mikroorganismen unterstützen, sodass Biokohle auch ein geeignetes Substrat zur Immobilisierung von Bakterien darstellt (Zhang et al., 2019).

Dennoch darf nicht außer Acht gelassen werden, dass organischer Kohlenstoff in Form von Biokohle ein großteils mikrobiell unzugängliches Material darstellt. Nur ein kleiner, labiler Kohlenstoff-Pool, der je nach Ausgangsmaterial und Pyrolyse-Bedingungen nur 3-20 % des gesamten organischen Kohlenstoffs in der Biokohle darstellt, kann direkt das Bodenleben fördern. Viele andere Wirkungen von Biokohle auf die Bodenmikrobiologie sind indirekt durch die physikalisch-chemischen Eigenschaften der Biokohle bedingt (z. B. durch die poröse Struktur, den hohen pH, und die hohe Sorptionskapazität für Nähr- und Schadstoffe).

Wenn die Anwendung von Biokohle im Boden unter Bedingungen erfolgt, bei denen ein Mangel im Boden behoben wird bzw. die Bodenstruktur verbessert wird, kann die Förderung des Pflanzenwachstums und der mikrobiellen Lebensbedingungen insbesondere in der Rhizosphäre das Bodenleben und die langfristige Anreicherung auch von nicht Biokohlebürtigem organischem Kohlenstoff im Boden unterstützen.

Abbildung 23: Kohlenstoff-Struktur von Biokohle in Abhängigkeit von der Pyrolyse-Temperatur. Der aromatische Kohlenstoff liegt bei niedriger Pyrolyse-Temperatur (400 °C, linke Graphik) in weitgehend ungeordneter, amorpher Form vor, während sich bei steigenden Temperaturen (z. B. 800 °C, rechte Graphik) allmählich geordnete, graphitähnliche Strukturen bilden. (Nach Chia et al., 2015 (modifiziert))



#### Die Rolle von Biokohle im Boden-Kontinuumsmodell

Die hohe Widerstandskraft des größten Teils der Kohlenstoff-Fractionen von Biokohlen gegen mikrobiellen Abbau macht klar, dass  $C_{org}$  aus Biokohle nicht in gleicher Weise zu beurteilen ist wie  $C_{org}$  aus den Abbauprodukten von Pflanzen, Bodentieren und Mikroorganismen. Dadurch, dass der Biokohle-Kohlenstoff durch andere Mechanismen und in anderen Zeitskalen als der biogene Kohlenstoff abgebaut wird, sperrt er sich auf den ersten Blick gegen die Einteilung der bodenorganischen Substanz in partikuläre und mineralisch assoziierte (Lavalée et al., 2020). Der pyrogene Kohlenstoff in Biokohle stellt vielmehr gemeinsam mit natürlicher Holzkohle eine eigene Klasse des organischen Kohlenstoffs im Boden dar (Lavalée et al., 2019), der einerseits Eigenschaften der partikulären organischen Substanz biogenen Ursprungs, andererseits auch Mineralassoziiierungen und entsprechend lange Verweilzeiten im Boden aufweist.

Trotz dieser Sonderstellung des pyrogenen Kohlenstoffs in der SOM hat Biokohle auch im aktuellen Boden-Kontinuumsmodell als Nachfolger früherer Humus-Theorien ihren Platz. Die aktuelle Betrachtungsweise des allmählichen Abbaus von pflanzlichen und tierischen

Reststoffen in zuerst größere, dann kleinere Biopolymere und schließlich Monomere, welche mineralisiert werden (Lehmann und Kleber, 2015), passt auch zu einem deutlich zeitverzögerten, aber dennoch im Hintergrund ablaufenden Abbau der hochkondensierten aromatischen Kohlenstoffstruktur von Biokohle durch natürliche Oxidation und mikrobiellen Angriff. Die physikalische und chemische Zugänglichkeit des Biokohlen-Kohlenstoffs für Mikroorganismen spielt die Hauptrolle in der langsamen, sich über Jahrhunderte bis Jahrtausende erstreckenden Rezyklierung des langfristig, aber nicht ewig gebundenen Kohlenstoffs zu neuer partikulärer SOM oder zu atmosphärischem CO<sub>2</sub>.

### **7.2.3 Biokohle zur langfristigen Kohlenstoff-Bindung im Boden**

In den Anfangszeiten der Biokohle-Forschung stand für einige Zeit die Frage im Raum, ob die Zugabe von Biokohle im Boden nicht auf die bereits vorhandene organische Substanz im Boden durch Beschleunigung deren Abbaus („positive priming“) eine negative Wirkung ausüben könnte. Zahlreiche Studien konnten in der Zwischenzeit diese Befürchtungen eingrenzen und fanden hingegen Belege für eine schützende Wirkung von Biokohle gegen den weiteren Abbau der bereits vorhandenen SOM („negative priming“). Wie Cheng et al. (2017) sowie Zhang et al. (2020) feststellten, förderten vor allem höhere Temperaturen während des Pyrolyse-Prozesses die Produktion von Biokohlen, welche ein „negative priming“ der SOM bewirkten.

Die Strukturen frisch hergestellter Biokohle beinhalten noch einen höheren Anteil labileren Kohlenstoffs, der für mikrobiellen Abbau leichter zugänglich ist, jedoch aber bald verbraucht ist. Wenn die mikrobielle Aktivität durch eine derartige Biokohle anfangs gefördert wird, kann durch Ko-Metabolismus auch andere organische Substanz beschleunigt abgebaut werden (Liu et al, 2019). Diese Phase des „positive priming“ endet jedoch bald und führt mit fortschreitender Alterung der Biokohle im Boden zu einer Hemmung des mikrobiellen Abbaus anderer SOM. In einer zusammenfassenden Meta-Analyse stellten Ding et al. (2018) fest, dass die Phase des „positive priming“ spätestens nach 2 Jahren endet und vom „negative priming“ abgelöst wird.

Die Langlebigkeit des organischen Kohlenstoffs der Biokohle im Boden unterstützt gemeinsam mit den „negative-priming“-Effekten die langfristige Kohlenstoff-Bindung im Boden. Ausgangsmaterial und Pyrolyse-Bedingungen haben wesentlichen Einfluss auf die Verteilung des organischen Kohlenstoffs in labilere und stabilere Kohlenstoff-Fractionen. Wie am Beispiel in Abbildung 24 gezeigt wird, dominieren Modelle mit mehreren Kohlenstoff-Pools

unterschiedlicher Abbaugeschwindigkeiten die Vorstellungen des Kohlenstoff-BindungsPotenzials durch Biokohle. Ähnliche Modelle kommen derzeit auch bei der Entwicklung von internationalen Zertifizierungs-Programmen zur Berücksichtigung der Kohlenstoffbindung durch Biokohle zum Einsatz.

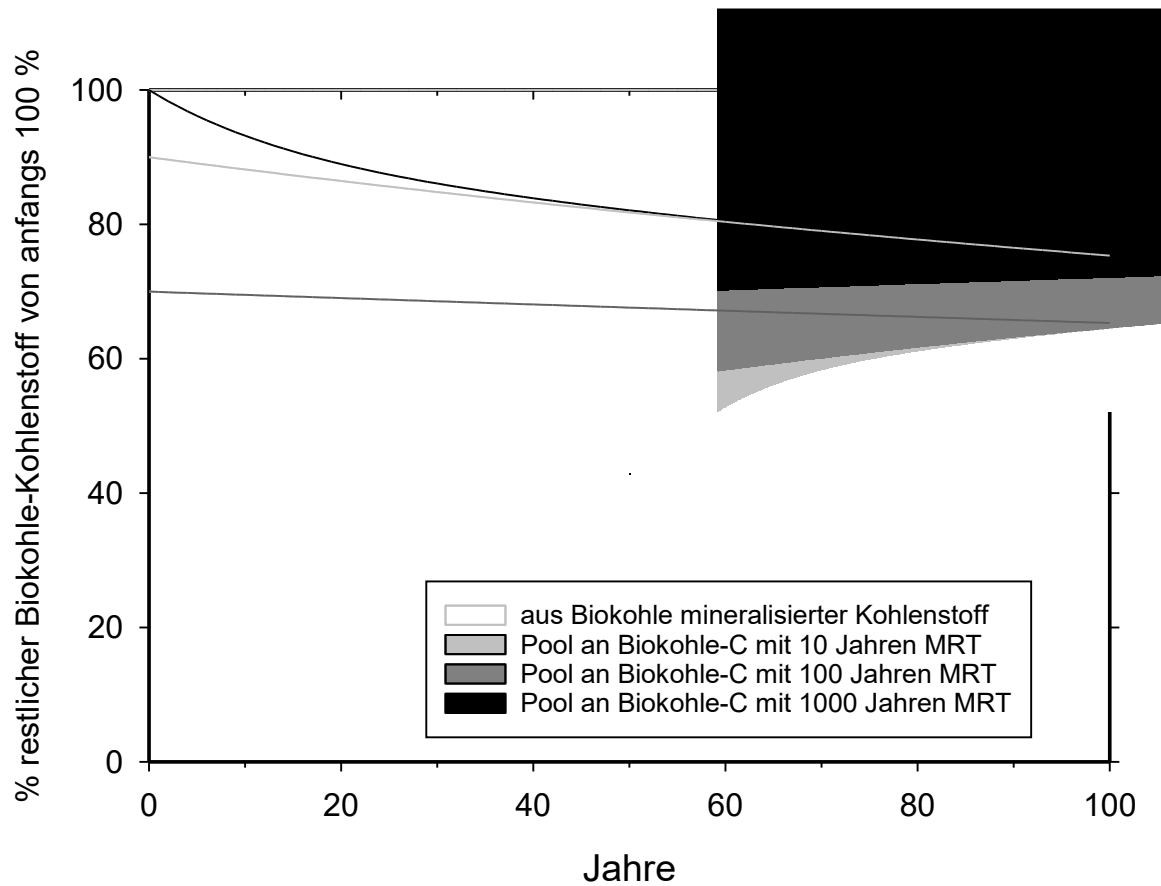
Das IPCC hat 2018 in seinem „Special Report“ über „Negative Emission Technologies“ Biokohle als eine von sechs relevanten Technologien gelistet, mit denen aus der Atmosphäre langfristig CO<sub>2</sub> entfernt und unschädlich gebunden werden kann. Zwar bestehen bei allen in Frage kommenden Technologien noch signifikante Unsicherheiten über Potenziale und Kosten, doch scheint Biokohle im Vergleich mit anderen Technologien mit weniger Nachteilen als andere Technologien behaftet zu sein und weist ein KohlenstoffbindungsPotenzial von jährlich rund 700 Mio. t CO<sub>2e</sub> auf (Smith, 2016).

Selbst wenn sich der Einsatz von Biokohle zur Kohlenstoffbindung im Boden wirtschaftlich darstellen lässt, ist darauf zu achten, dass nur Biokohle, welche nach ÖNORM S 2211 oder nach European Biochar Certificate<sup>2</sup> zertifiziert ist, in landwirtschaftlichen Böden zum Einsatz kommt. Optimalerweise wird eine Biokohle eingesetzt, welche auf die aktuelle Standortsituation des Bodens Rücksicht nimmt und darauf abgestimmt ist, Standortprobleme lokal zu verbessern. Ist dies der Fall, kann der Landwirt als „Klimafarmer“ nicht nur Vorteile der Kohlenstoffbindung, sondern auch der lokalen Bodenverbesserung und nachhaltigen Bodenbewirtschaftung lukrieren.

---

<sup>2</sup> <http://www.european-biochar.org/en>, abgerufen 17.5.2020

Abbildung 24: Relative Veränderungen der Kohlenstoff-Pools aus Biokohle im Boden im Verlauf von 100 Jahren unter Anwendung eines 3-Pool-Modells. Annahmen: durchschnittliche Holz-basierte Biokohle mit 500-600 °C Pyrolysetemperatur. MRT = mittlere Verweilzeit (nach Lehmann et al., 2015 (modifiziert))





## **Tabellenverzeichnis**

|                                                                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 1: Kohlenstoff-Gehalt und Kohlenstoff-Vorrat in Böden unter Dauergrünland (A-Horizont, 0-10 cm Bodentiefe) in Abhängigkeit von der Wasserhaushaltsstufe..... | 38 |
| Tabelle 2: Kriterien zur Beurteilung der Spatenprobe .....                                                                                                           | 46 |
| Tabelle 3: Übersicht über Beratungsthemen und durchführende Institutionen.....                                                                                       | 58 |

## Abbildungsverzeichnis

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 1: Humus als Ökosystemeigenschaft (Dungait et al. 2012) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 8  |
| Abbildung 2: Humuspools, deren Bildungspfade und Stabilisierungsmechanismen<br>(Ungefähre Angabe der mittleren Verweilzeiten der Pools in der Abbildung und im<br>nachfolgenden Text nach Von Lützw et al., 2007) .....                                                                                                                                                                            | 10 |
| Abbildung 3: Wirkung von Begrünung und nachfolgender Mulch- und Direktsaat bei<br>erosionsgefährdeten Kulturen auf den Bodenabtrag pro ha im Jahr 2018 bei biologischer<br>und konventioneller Wirtschaftsweise in den Bundesländern und Regionen (Strauss et. al<br>2020, Bodenerosion in Österreich – Eine nationale Berechnung mit regionalen Daten und<br>lokaler Aussagekraft für ÖPUL) ..... | 16 |
| Abbildung 4: Wirkung von Erosionsschutzmaßnahmen im Wein- und Obstbau –<br>wesentlichen Einfluss hat nur die ganzjährige Begrünung (Strauss et. al 2020,<br>Bodenerosion in Österreich – Eine nationale Berechnung mit regionalen Daten und<br>lokaler Aussagekraft für ÖPUL) .....                                                                                                                | 17 |
| Abbildung 5: Eindringwiderstand (Verdichtungen) mittels Penetrometer auf<br>Versuchsflächen der LK Steiermark bis in eine Tiefe von 80 cm; Grafik oben: kaum<br>Verdichtungen; Grafik mitte: starke Unterbodenverdichtung; Grafik unten:<br>Pflugsohlenverdichtung; (Johannes Maßwohl, LK Steiermark) .....                                                                                        | 19 |
| Abbildung 6: Gesamtösterreichische Karte des organischen Kohlenstoffvorrates [t/ha] im<br>Boden in 0-30 cm Tiefe umgelegt auf den 1 x 1 km ETRS-LAEA-Raster Asoc Projekt<br>(Baumgarten et al., 2018).....                                                                                                                                                                                         | 21 |
| Abbildung 7: Verlauf des Corg - Vorrates von Ackerböden (t/ha in den obersten 20 cm) für<br>die 3 Regionen Traun-Enns-Platte (TEP), Marchfeld und Tullner Feld (Dersch, 2019).....                                                                                                                                                                                                                 | 22 |
| Abbildung 8: Prüfung der Aggregatstabilität – Slake Test (Fotos: Johannes Zauner, Verein<br>Boden.Leben) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 43 |
| Abbildung 9: Aggregatstabilität – Flaschentest (Fotos: Lorenz Mayr, Verein<br>Boden.Leben) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 44 |
| Abbildung 10: Spatenprobe (Foto: Claudia Winkowitsch) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 45 |
| Abbildung 11: CO <sub>2</sub> -Emissionen bzw. Senken durch Bodenkohlenstoffveränderungen in<br>Österreichs Acker- und Grünlandböden gemäß Österreichischer Treibhausgasinventur<br>(Umweltbundesamt 2020) .....                                                                                                                                                                                   | 47 |
| Abbildung 12: Bilanzierungsergebnisse von Beispielbetrieben (Franz Hölzl,<br>Boden.Wasser.Schutz Beratung) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 49 |
| Abbildung 13: Prinzip der Humusbilanzierung (Eva Erhard, Bioforschung Austria) .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 51 |
| Abbildung 14: Bodenkarte: <a href="http://www.bodenkarte.at">www.bodenkarte.at</a> .....                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 53 |
| Abbildung 15: Verlauf der Humusgehalte in 3 ausgewählten Regionen (Dersch, 2019).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 57 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Abbildung 16: Bestimmung der Bodenart (Foto: Thomas Rupp).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 60  |
| Abbildung 17: Beziehung zwischen Humusgehalt und Sandanteil (Johannes Maßwohl, LK<br>Steiermark).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 67  |
| Abbildung 18: Beziehung zwischen Humusgehalt und C/N – Verhältnis: die meisten<br>Datenpunkten finden sich im Bereich um 10 (Johannes Maßwohl, LK Steiermark).....                                                                                                                                                                                                                                                                | 68  |
| Abbildung 19: Räumliche Inhomogenitäten des Humusgehaltes, Angaben in % gesamter<br>organischer Kohlenstoff (TOC): Fett gedruckt – Gehalte gemäß Bodenform; Weiß<br>hinterlegt: aktuell gemessene Daten (Ausschnitt ca. 1.000 x 1.200 m) (Baumgarten et al.,<br>2021).....                                                                                                                                                        | 71  |
| Abbildung 20: Die 3 Prinzipien des Humusaufbaus (Gerald Dunst, Ökoregion Kaindorf) ...                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 74  |
| Abbildung 21: Schema des Humusaufbauprogramms (Gerald Dunst, Ökoregion<br>Kaindorf).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 75  |
| Abbildung 22: Prozess-Darstellung Humusaufbauprogramm (Claudia Mittermayr, RWA<br>claudia.mittermayr@rwa.at).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 78  |
| Abbildung 23: Kohlenstoff-Struktur von Biokohle in Abhängigkeit von der Pyrolyse-<br>Temperatur. Der aromatische Kohlenstoff liegt bei niedriger Pyrolyse-Temperatur (400 °C,<br>linke Graphik) in weitgehend ungeordneter, amorpher Form vor, während sich bei<br>steigenden Temperaturen (z. B. 800 °C, rechte Graphik) allmählich geordnete,<br>graphitähnliche Strukturen bilden. (Nach Chia et al., 2015 (modifiziert))..... | 107 |
| Abbildung 24: Relative Veränderungen der Kohlenstoff-Pools aus Biokohle im Boden im<br>Verlauf von 100 Jahren unter Anwendung eines 3-Pool-Modells. Annahmen:<br>durchschnittliche Holz-basierte Biokohle mit 500-600 °C Pyrolysetemperatur. MRT =<br>mittlere Verweilzeit (nach Lehmann et al., 2015 (modifiziert)).....                                                                                                         | 110 |

## Literaturverzeichnis

**Angers, D. A., Arrouays, D., Saby, N. P. A., und Walter, C. (2011):** Estimating and mapping the carbon saturation deficit of French agricultural topsoils. *Soil Use and Management*, 27(4), 448-452.

**Alvarez, R., Lavado, R.S. (1998):** Climate, organic matter and clay content relationships in the Pampa and Chaco soils, Argentina. *Geoderma* 83, 127-141.

**Asmus, F. (1992):** Einfluss organischer Dünger auf Ertrag, Humusgehalt des Bodens und Humusreproduktion. In: *Berichte über Landwirtschaft*, 206. Sonderheft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Band 4, Humushaushalt, 127-139.

**Baumgarten, A., Dersch, G., Hösch, J., Spiegel, H., Freudenschuss, A., Strauss, P. (2011):** Bodenschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft. In 3. Umweltökologisches Symposium (p. 19).

**Baumgarten, A., et al. (2018):** Österreichische Karte des organischen Bodenkohlenstoffs, ([https://www.dafne.at/dafne\\_plus\\_homepage/index.php?section=dafneplus&content=result&come\\_from=simple&p1=ASOC&p2=&opr=&ck1=&ck2=&project\\_id=3578](https://www.dafne.at/dafne_plus_homepage/index.php?section=dafneplus&content=result&come_from=simple&p1=ASOC&p2=&opr=&ck1=&ck2=&project_id=3578)).

**Baumgarten, A., Haslmayr, H.-P., Schwarz, M., Aust G., Schmaltz E., Tulipan M., Wenzel W. (2021):** LUCASSA – LUCAS Soil Austria. Endbericht zum Forschungsprojekt Nr. 101348 (<https://dafne.at/projekte/lucassa>)

**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. and Jandl, R. (2021):** Soil carbon in Austria – status quo and foreseeable trends. *Geoderma* (402,2021).

**Bio Forschung Austria (Hrsg.), 2016:** Humusbilanzierung für die Praxis. Leitfaden zur Humusbilanzierung für Ackerbaubetriebe ohne oder mit geringer Tierproduktion im Rahmen des Projekts „Humusmanagement und regionale Biodüngerproduktion“. 3. Auflage, erschienen im Eigenverlag.

**BMLFUW (2015):** Boden und Klima. Einflussfaktoren, Daten, Maßnahmen und Anpassungsmöglichkeiten. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

**BMNT (2019):** Evaluierung des Österreichischen Agrar-Umweltprogramms ÖPUL – Nationaler Detailbericht, Wien

**Bodner, G. (2007):** COVER CROPPING IN WATER LIMITED ENVIRONMENTS, A FIELD AND MODELLING STUDY OF HYDROLOGICAL AND SOIL STRUCTURAL EFFECTS OF COVER CROPS AND THEIR IMPACT ON THE WATER BALANCE, PhD Thesis

**Bohner, A. (2012):** Grassland soils-properties and functions. Local land & soil news 42/43, 7-9.

**Bohner, A. (2021):** Grünland humusschonend bewirtschaften. Landwirt 4/2021, 24-26.

**Bohner, A., Foldal, C.B., Jandl, R. (2016):** Kohlenstoffspeicherung in Grünlandökosystemen – eine Fallstudie aus dem österreichischen Berggebiet. Die Bodenkultur 67 (4), 225-237.

**Bohner, A., Grims, F., Sobotik, M. (2007):** Die Rotschwingel-Straußgraswiesen im Mittleren Steirischen Ennstal (Österreich) – Ökologie, Soziologie und Naturschutz. Mitteilungen des naturwissenschaftlichen Vereines für Steiermark 136, 113-134.

**Bohner, A., Herndl, M. (2011):** Einfluss einer Nutzungsintensivierung auf Wurzelmasse und Wurzelverteilung im Grünlandboden. 1. Tagung der Österreichischen Gesellschaft für Wurzelforschung, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 35-44.

**Bohner, A., Huemer, C., Schaumberger J., Liebhard, P. (2012):** Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung und des Reliefs auf den Nährstoffgehalt im Oberboden mit besonderer Berücksichtigung des Phosphors. 3. Umweltökologisches Symposium, LFZ Raumberg-Gumpenstein, 91-100.

**Bohner, A., Karrer J., Walcher R., Brandl, D., Michel K., Arnberger A., Frank T., Zaller J.G. (2019):** Ecological responses of semi-natural grasslands to abandonment: case studies in three mountain regions in the Eastern Alps. Folia Geobotanica 54, 211-225.

**Bolinder, M.A., Kätterer, T., Andrén, O., Parent, L.E. (2012):** Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. Canadian Journal of Soil Science 92, 821–833.  
<https://doi.org/10.4141/cjss2012-036>

**Bolinder, M.A., Kätterer, T., Andrén, O., und Parent, L.E. (2012):** Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. Canadian Journal of Soil Science 92, 821–833.  
<https://doi.org/10.4141/cjss2012-036>

**Brock, C., Hoyer, U., Leithold, G., and Hülsbergen, K. J. (2008):** "Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau." BÖL-Bericht-ID 16447, Abschlussbericht zum Projekt 03OE084. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau (BÖL).

**Bruni, E., Guenet, B., Huang, Y., Clivot, H., Virto, I., Farina, R., Kätterer, T., Ciais, P., Martin, M, 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

**Campbell, C.A., Zentner, R.P., Liang, B.-C., Roloff, G., Gregorich, E.C. und Blomert, B. (2000):** Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan – Effect of crop rotations and fertilizers. Canadian Journal of Soil Science 80, 179–192. <https://doi.org/10.4141/S99-028>

**Campbell, C.A., Zentner, R.P., Liang, B.-C., Roloff, G., Gregorich, E.C., Blomert, B. (2000):** Organic C accumulation in soil over 30 years in semiarid southwestern Saskatchewan – Effect of crop rotations and fertilizers. Canadian Journal of Soil Science 80, 179–192.  
<https://doi.org/10.4141/S99-028>

**Cheng, H.G., Hill, P.W., Bastami, M.S. und Jones, D.L. (2017):** Biochar stimulates the decomposition of simple organic matter and suppresses the decomposition of complex organic matter in a sandy loam soil. Global Change Biology Bioenergy 9, 1110-1121,

**Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D. und Balesdent, J. (2019):** Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and Potenzial innovations. Soil and Tillage Research 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>

**Chenu, C., Angers, D.A., Barré, P., Derrien, D., Arrouays, D., Balesdent, J. (2019):** Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and Potenzial innovations. Soil and Tillage Research 188, 41–52. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.04.011>

**Chia, C.H., Downie, A. und Munroe, P. (2015):** Characteristics of biochar: physical and structural properties. In: Lehmann, J. und Joseph, S.: Biochar for Environmental Management. 2<sup>nd</sup> edition. Earthscan, Routledge, London and New York. 89-109

**Conant, R.T., Paustian, K. (2002):** Potenzial soil carbon sequestration in overgrazed grassland ecosystems. Global Biogeochemical Cycles 16 (4), 1143.

**Dersch, G., et al. (2013):** Humusgehalt, Säuregrad und pflanzenverfügbare Phosphor und Kaliumgehalte auf Acker- und Grünland in Oberösterreich.

**Dersch, G. (2019):** Vorläufige Auswertungen der Bodendaten aus der VHA "Vorbeugender Grundwasserschutz auf Ackerland".

**Diacono, M. und Montemurro, F. (2011):** Long-Term Effects of Organic Amendments on Soil Fertility, in: Lichtfouse, E., Hamelin, M., Navarrete, M., Debaeke, P. (Eds.), Sustainable Agriculture Volume 2. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 761–786.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0\\_34](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0_34)

**Diacono, M., Montemurro, F. (2011):** Long-Term Effects of Organic Amendments on Soil Fertility, in: Lichtfouse, E., Hamelin, M., Navarrete, M., Debaeke, P. (Eds.), Sustainable Agriculture Volume 2. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 761–786.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0\\_34](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0394-0_34)

**Ding, F., Van Zwieten, L., Zhang, W.D., Weng, Z., Shi, S.W., Wang, J.K. und Meng, J. (2018):** A meta-analysis and critical evaluation of influencing factors on soil carbon priming following biochar amendment. Journal of Soils and Sediments 18, 1507-1517

**Don, A., Flessa, H. und Marx, K. (2018):** Die 4-Promille-Initiative “Böden für Ernährungssicherung und Klima” - Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Johann Heinrich von Thünen-Institut.

**Don, A., Flessa, H., Marx, K. (2018):** Die 4-Promille-Initiative “Böden für Ernährungssicherung und Klima” - Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Johann Heinrich von Thünen-Institut.

**Dungait, J.A.J., Hopkins, D.W., Gregory, A.S. und Whitmore, A.P. (2012):** Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. *Global Change Biology* 18, 1781-1796. [10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02665.x)

**Edegar Galicia-Adr s, E., Oostenbrink, C., Gerzabek, M.H., Tunega, D. (2021):** On the adsorption mechanism of humic substances on kaolinite and their microscopic structure. *Minerals* 11, 1138. <https://doi.org/10.3390/min11101138>

**Fisher, M.J., Rao, I.M., Ayarza, M.A., Lascano, C.E., Sanz, J.I., Thomas, R.J., Vera, R.R. (1994):** Carbon storage by introduced deep-rooted grasses in the South American savannas. *Nature* 371, 236-238.

**Freibauer, A., Rounsevell, M.D.A., Smith, P., Verhagen, J. (2004):** Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.021>

**Freibauer, A., Rounsevell, M.D.A., Smith, P., Verhagen, J. (2004):** Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122, 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2004.01.021>

**Gattinger, A., Muller, A., Haeni, M., Skinner, C., Fliessbach, A., Buchmann, N., Mader, P., Stolze, M., Smith, P., Scialabba, N.E.-H., Niggli, U. (2012):** Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, 18226–18231. <https://doi.org/10.1073/pnas.1209429109>

**Gebetsroither E, Strebl F, Schwaiger H, Jaekel U, Jungmeier G, Canella L, Spitzer J, Hintermeier G, et al. (2001):** The Austrian Carbon Balance Model (ACBM): Final Project Report Annex. Research Report OEFZS-S-0112, Austrian Research Centers, Seibersdorf, Austria [2001], IIASA, Laxenburg, Austria.



**Gerzabek, M.H., Strebl, F., Tulipan, M., Schwarz, S. (2005):** Quantification of organic carbon pools for Austria's agricultural soils using a soil information system. Canadian Journal of Soil Science 85, 491-498.

**Gerzabek, M.H., Aquino, A.J.A., Balboa, Y.I.E., Galicia-Andrés, E., Grancic, P., Oostenbrink, C., Petrov, D., Tunega, D. (2022):** A contribution of molecular modeling to supramolecular structures in soil organic matter. J. Plant Nutr. Soil Sci. 185, 44-59.

**Gollner G., Friedel J.K., Wohlmuth M-L., Surböck A. (2019):** Systeme reduzierter Bodenbearbeitung im Trockengebiet Österreichs - Macht reduzierte Bodenbearbeitung den Boden klimafitter? BIO AUSTRIA Niederösterreich und Wien (Hrsg.), Matthias Corvinusstraße 8/UG, 3100 St. Pölten [https://www.bio-austria.at/app/uploads/2020/02/BIOBO\\_Broschuere.pdf](https://www.bio-austria.at/app/uploads/2020/02/BIOBO_Broschuere.pdf)

**Grüner Bericht (2019):** Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus Wien.

**Guckert, A. (1992):** Bedeutung der Pflanzenwurzeln und ihrer Ausscheidungen als Quellen organischer Stoffe im Boden. In: Berichte über Landwirtschaft, 206. Sonderheft, Bodennutzung und Bodenfruchtbarkeit, Band 4, Humushaushalt, 97-113.

**Henderson, D.C., Ellert, B.H., Naeth, M.A. (2004):** Grazing and soil carbon along a gradient of Alberta rangelands. Journal of Range Management 57, 402-410.

**Herold, N., Schöning, I., Michalzik B., Trumbore S., Schrumpf M. (2014):** Controls on soil carbon storage and turnover in German landscapes. Biogeochemistry 119, 435-451.

**Höper, H. (2007):** Freisetzung von Treibhausgasen aus deutschen Mooren. Telma 27, 85-116.

**Hoxha, A., Christensen, B. (2019):** The carbon footprint of fertiliser production: regional reference values. Proceedings 805, International Fertiliser Society, Prague. ISBN 978-0-85310-442-1

**Jackson RB, Lajtha K, Crow SE, Hugelius G, Kramer MG, Piñeiro G. (2017):** The ecology of soil carbon: pools, vulnerabilities, and biotic and abiotic controls. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics 48: 419– 445.

**Keiblinger, K. M., Hall, E. K., Wanek, W., Szukics, U., Hämmerle, I., Ellersdorfer, G., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2010):** The effect of resource quantity and resource stoichiometry on microbial carbon-use-efficiency. *FEMS Microbiology Ecology*, 73(3), 430-440.

**Klapp, E. (1971):** Wiesen und Weiden. 4. Auflage. Parey Verlag, 620 S.

**Kleber, M., Stahr, K. (1995):** Soil carbon turnover in subalpine systems and its dependence on climate. In: Zwerver, S., van Rompaey, R.S.A.R., Kok, M.T.J., Berk, M.M. (Eds.): *Climate Change Research: Evaluation and Policy Implications*. 561-566.

**Klik, A., Rosner, J., (2020):** Long-term experience with conservation tillage practices in Austria: Impacts on soil erosion processes. *Soil and Tillage Research* 203:104669, DOI: 10.1016/j.still.2020.104669

**Kolbe, H. (2007):** Einfache Methode zur standortangepassten Humusbilanzierung von Ackerland unterschiedlicher Anbauintensität. In: Zikeli S., Claupein W, Dabbert S., Kaufmann B., Müller T, Valle Zárate (Hrsg.): *Zwischen Tradition und Globalisierung. Beiträge zur 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*. pp. 5-8. Verlag Dr. Köster, Berlin.

**Kononova, M.M. (1966):** Soil organic matter: Its nature, its role in soil formation and in soil fertility. 2<sup>nd</sup> ed. Pergamon Press, Oxford, UK.

**Kühnel, A., Garcia Franco, N., Wiesmeier, M., Burmeister, J., Hobley, E., Kiese, R., Dannenmann, M., Kögel-Knabner, I. (2019):** Controlling factors of carbon dynamics in grassland soils of Bavaria between 1989 and 2016. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 280, 118-128.

**Ladha, J.K., Reddy, C.K., Padre, A.T., van Kessel, C. (2011):** Role of Nitrogen Fertilization in Sustaining Organic Matter in Cultivated Soils. *Journal of Environmental Quality* 40, 1756–1766. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0064>

**Ladha, J.K., Reddy, C.K., Padre, A.T., van Kessel, C. (2011):** Role of Nitrogen Fertilization in Sustaining Organic Matter in Cultivated Soils. *Journal of Environmental Quality* 40, 1756–1766. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0064>

**Lange, M., Eisenhauer, N., Sierra, C. A., Bessler, H., Engels, C., Griffiths, R. I., & Steinbeiss, S. (2015):** Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. *Nature Communications*, 6(1), 1-8.

**Lavallee, J. M., Soong, J. L., & Cotrufo, M. F. (2020):** Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century (2020). *Global change biology*, 26(1), 261-273.

**Lavallee, J.M., Conant, R.T., Haddix, M.L., Follett, R.F., Bird, M.I. und Paul, E.A. (2019):** Selective preservation of pyrogenic carbon across soil organic matter fractions and its influence on calculations of carbon mean residence times. *Geoderma* 354, 113866,

**Lehmann, J., Abiven, S., Kleber, M., Pan, G.X., Pal Singh, B., Sohi, S.P. und Zimmerman, A.R. (2015):** Persistence of biochar in soil. In: Lehmann, J. und Joseph, S.: *Biochar for Environmental Management*. 2<sup>nd</sup> edition. Earthscan, Routledge, London and New York. 235-282

**Lehmann, J. und Kleber, M. (2015):** The contentious nature of soil organic matter. *Nature* 528, 60-68,

**Lehmann, J., Hansel, C.M., Kaiser, C., Kleber, M., Maher, K., Manzoni, S. Nunan, N. Reichenstein, M. Schimel, J.P., Torn, M.S., Wieder, W.R. und Kögl-Knabner, I. (2020):** Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nature Geoscience* **13**, 529–534. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0612-3>

**Lehtinen, T., Dersch, G., Söllinger, J., Baumgarten, A., Schlatter, N., Aichberger, K., Spiegel, H. (2017):** Long-term amendment of four different compost types on a loamy silt Cambisol: impact on soil organic matter, nutrients and yields. *Archives of Agronomy and Soil Science* 63, 663–673. <https://doi.org/10.1080/03650340.2016.1235264>

**Lehtinen, T., Schlatter, N., Baumgarten, A., Bechini, L., Krüger, J., Grignani, C., Zavattaro, L., Costamagna, C., Spiegel, H. (2014):** Effect of crop residue incorporation on soil organic carbon and greenhouse gas emissions in European agricultural soils. *Soil Use and Management* 30, 524–538. <https://doi.org/10.1111/sum.12151>

**Leifeld, J., Bassin, S., Fuhrer, J. (2005):** Carbon stocks in Swiss agricultural soils predicted by land-use, soil characteristics, and altitude. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 105, 255-266.

**Leifeld, J., Zimmermann, M., Fuhrer, J., Conen, F. (2009):** Storage and turnover of carbon in grassland soils along an elevation gradient in the Swiss Alps. *Global Change Biology* 15, 668-679.

**Liang, C., Schimel, J. P., und Jastrow, J. D. (2017):** The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. *Nature Microbiology*, 2(8), 1-6.

**Liu, Z.W., Zhu, M.T., Wang, J.M., Liu, X.X., Guo, W.J., Zheng, J.F., Bian, R.J., Wang, G.M., Zhang, X.H., Cheng, K., Liu, X.Y., Li, L.Q. und Pan, G.X. (2019):** The responses of soil organic carbon mineralization and microbial communities to fresh and aged biochar soil amendments. *Global Change Biology Bioenergy* 11, 1408-1420

**Lu, M., Zhou, X., Luo, Y., Yang, Y., Fang, C., Chen, J., Li, B. (2011):** Minor stimulation of soil carbon storage by nitrogen addition: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 140, 234–244. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.12.010>

**Luo, Z., Wang, E., Sun, O.J. (2010):** Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139, 224–231. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.08.006>

**Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., & Ågren, G. I. (2012):** Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils. *New Phytologist*, 196(1), 79-91.

**Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T.H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., Antón, A., Boldrin, A. (2013):** Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 721–732. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0148-7>

**Martínez-Blanco, J., Lazcano, C., Christensen, T.H., Muñoz, P., Rieradevall, J., Møller, J., Antón, A., Boldrin, A. (2013):** Compost benefits for agriculture evaluated by life cycle assessment. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 33, 721–732. <https://doi.org/10.1007/s13593-013-0148-7>

**Meena, R.S., Kumar, S., Yadav, G.S. (2020):** Soil Carbon Sequestration in Crop Production, in: Meena, R.S. (Ed.), Nutrient Dynamics for Sustainable Crop Production. Springer Singapore, Singapore, pp. 1–39. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-8660-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-13-8660-2_1)

**Mestdagh, I., Lootens, P., Carlier, L. (2006):** Variation in organic carbon concentration and bulk density in Flemish grassland soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 616–622.

**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., van Wesemael, B., Winowiecki, L. (2017):** Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292, 59–86.  
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002>

**Neufeldt, H. (2005):** Carbon stocks and sequestration Potenzials of agricultural soils in the federal state of Baden-Württemberg, SW Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 202–211.

**Olk, D.C., Bloom, P.R., Perdue, E.M., McKnight, D.M., Chen, Y., Fahrenhorst, A., Senesi, N., Chin, Y.-P., Schmitt-Kopplin, P., Hertkorn, N. and Harir, M. (2019):** Environmental and Agricultural Relevance of Humic Fractions Extracted by Alkali from Soils and Natural Waters. *Journal of Environmental Quality* 48, 217–232.

**ÖNORM L 1051** Physikalische Bodenuntersuchungen Probenahme unter Beibehaltung der Bodenstruktur (Stechzylindermethode)

**ÖNORM L 1072** Physikalische Bodenuntersuchungen Bestimmung der Aggregatstabilität nach dem Siebtauchverfahren

**ÖNORM EN ISO 11272:** Bodenbeschaffenheit — Bestimmung der Trockenrohdichte

**Percival, H.J., Parfitt, R.L., Scott, N.A. (2000):** Factors controlling soil carbon levels in New Zealand Grasslands: Is clay content important? *Soil Science Society of America Journal* 64, 1623–1630.

**Petrov, D., Tunega, D., Gerzabek, M.H., Oostenbrink, C. (2020):** Molecular modelling of sorption processes of a range of diverse small organic molecules in Leonardite humic acid. *European Journal of Soil Science* 71, 831–844.

**Poeplau, C., Don, A. (2015):** Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, 33–41.  
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>

**Poeplau, C., Don, A., Six, J., Kaiser, M., Benbi, D., Chenu, C., & Gregorich, E. (2018):** Isolating organic carbon fractions with varying turnover rates in temperate agricultural soils—A comprehensive method comparison (2018). *Soil Biology and Biochemistry*, 125, 10–26.

**Powlson, D.S., Stirling, C.M., Jat, M.L., Gerard, B.G., Palm, C.A., Sanchez, P.A., Cassman, K.G. (2014):** Limited Potenzial of no-till agriculture for climate change mitigation. *Nature Climate Change* 4, 678–683. <https://doi.org/10.1038/nclimate2292>

**Rasse, D.P., Rumpel, C., Dignac, M.-F. (2005):** Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil* 269, 341–356.

**Recous, S., Robin, D., Darwis, D., Mary, B. (1995):** Soil inorganic N availability: Effect on maize residue decomposition. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 1529–1538.  
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00096-W](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00096-W)

**Recous, S., Robin, D., Darwis, D., Mary, B. (1995):** Soil inorganic N availability: Effect on maize residue decomposition. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 1529–1538.  
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(95\)00096-W](https://doi.org/10.1016/0038-0717(95)00096-W)

**Renger, M., Wessolek, G., Schwärzel, K., Sauerbrey, R., Siewert, C. (2002):** Aspects of peat conservation and water management. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 487–493.

**Riggers, C., Poeplau, C., Don, A., Frühauf, C., Dechow, R. (2021):** How much carbon input is required to preserve or increase projected soil organic carbon stocks in German croplands under climate change? *Plant Soil* (2021) 460:417–433

**Sala, O.E., Lauenroth, W.K., Burke, I.C. (1996):** Carbon budgets of temperate grasslands and the effects of global change. In: Breymeyer, A.I., Hall, D.O., Melillo, J.M., G.I. Agren (Hrsg.): Global Change: Effects on coniferous forests and grasslands. Wiley, London, 101-119.

**Sandén, T., Lair, G. J., Van Leeuwen, J. P., Gísladóttir, G., Bloem, J., Ragnarsdóttir, K. V., & Blum, W. E. (2017):** Soil aggregation and soil organic matter in conventionally and organically farmed Austrian Chernozems/Bodenaggregation und organische Substanz in konventionell und biologisch bewirtschafteten österreichischen Tschernosemböden. Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment, 68(1), 41-55.

**Sanders J, Heß J (eds) (2019):** Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft . 2. überarbeitete und ergänzte Auflage. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut , 398 p, Thünen Rep 65, DOI:10.3220/REP1576488624000

**Schlesinger, W.H., Amundson, R. (2018):** Managing for soil carbon sequestration: Let's get realistic. Global Change Biology 25, 386–389. <https://doi.org/10.1111/gcb.14478>

**Schmidt, M. W., Torn, M. S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I. A., & Nannipieri, P. (2011):** Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. Nature, 478(7367), 49-56.

**Schuman G.E., Janzen, H.H., Herrick, J.E. (2002):** Soil carbon dynamics and Potenzial carbon sequestration by rangelands. Environmental pollution 116, 391-396.

**Schuster, J.L. (1964):** Root development of native plants under three grazing intensities. Ecology 45, 63-70.

**Shahbaz, M., Kumar, A., Kuzyakov, Y., Börjesson, G., Blagodatskaya, E. (2018):** Interactive priming effect of labile carbon and crop residues on SOM depends on residue decomposition stage: Three-source partitioning to evaluate mechanisms. Soil Biology and Biochemistry 126, 179–190. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.08.023>

**Sims, Z.R., Nielsen, G.A. (1986):** Organic carbon in Montana soils as related to clay content und climate. Soil Science Society of America Journal 50, 1269-1271.

**Sinsabaugh, R. L., Manzoni, S., Moorhead, D. L., & Richter, A. (2013):** Carbon use efficiency of microbial communities: stoichiometry, methodology and modelling. *Ecology letters*, 16(7), 930-939.

**Six, J. A. E. T., Elliott, E. T., & Paustian, K. (2000):** Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biology and Biochemistry*, 32(14), 2099-2103.

**Smith, P. (2016):** Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology* 22, 1315-1324,

**Smith, P. (2004):** How long before a change in soil organic carbon can be detected? *Global Change Biology* 10, 1878-1883.

**Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J. (2012):** No-till in northern, western and southwestern Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research* 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>

**Soane, B.D., Ball, B.C., Arvidsson, J., Basch, G., Moreno, F., Roger-Estrade, J. (2012):** No-till in northern, western and southwestern Europe: A review of problems and opportunities for crop production and the environment. *Soil and Tillage Research* 118, 66–87. <https://doi.org/10.1016/j.still.2011.10.015>

**Sokol, N. W., & Bradford, M. A. (2019):** Microbial formation of stable soil carbon is more efficient from belowground than aboveground input. *Nature Geoscience*, 12(1), 46-53.

**Sokol, N. W., Sanderman, J., & Bradford, M. A. (2019):** Pathways of mineral-associated soil organic matter formation: Integrating the role of plant carbon source, chemistry, and point of entry. *Global change biology*, 25(1), 12-24.

**Soussana, J.-F., Loiseau, P., Vuichard, N., Ceschia, E., Balesdent, J., Chevallier, T., Arrouays, D. (2004):** Carbon cycling and sequestration opportunities in temperate grasslands. *Soil Use and Management* 20, 219-230.



**Spiegel, H. (2012):** Impacts of arable management on soil organic carbon and nutritionally relevant elements in the soil-plant system. Habilitation. Ed. University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU).

**STATISTIK AUSTRIA (2018):** Agrarstrukturerhebung – Stichprobe 2016 - Betriebsstruktur. Schnellbericht 1.17. Statistik Austria Wien.

**Strauss, P., Schmaltz, E., Krammer, C., Zeiser, A., Weinberger, C., Kuderna, M., Dersch, D. (2020):** Bodenerosion in Österreich – Eine nationale Berechnung mit regionalen Daten und lokaler Aussagekraft für ÖPUL. Endbericht, 32-434/20, Petzenkirchen.

**Strauss, P. (2001):** Runoff, soil erosion and related physical properties after 7 years of compost application. Proceedings “Applying compost benefits and needs”, Brussels, Belgium, 22.-23.11.2001, 219-224.

**Strauss, P. and E. Klaghofer, (2001):** Effects of soil erosion on soil characteristics and productivity. Die Bodenkultur, 52: 2, 147-153.

**Succow M., Joosten, H. (Hrsg.) (2001):** Landschaftsökologische Moorkunde. 2. Auflage. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, 622 S.

**Tatzber, M., Stemmer, M., Spiegel, H., Katzlberger, C., Haberhauer, G., Gerzabek, M. H. (2008):** Impact of different tillage practices on molecular characteristics of humic acids in a long-term field experiment - An application of three different spectroscopic methods. SCI TOTAL ENVIRON, 406, 256-268; ISSN 0048-9697, 2008.

**Tidåker, P., Sundberg, C., Öborn, I., Kätterer, T., Bergkvist, G. (2014):** Rotational grass/clover for biogas integrated with grain production – A life cycle perspective. Agricultural Systems 129, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.015>

**Tidåker, P., Sundberg, C., Öborn, I., Kätterer, T., Bergkvist, G. (2014):** Rotational grass/clover for biogas integrated with grain production – A life cycle perspective. Agricultural Systems 129, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2014.05.015>

**Tiefenbacher, A.; Sandén, T.; Haslmayr, H.-P.; Miloczki, J.; Wenzel, W.; Spiegel, H. (2021):** Optimizing Carbon Sequestration in Croplands: A Synthesis. Agronomy, 11, (5).

**Umweltbundesamt (2020):** Austria's National Inventory Report 2020. Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Reports, Band 0724, ISBN: 978-3-99004-544-2, 780 S., <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0724.pdf>

**van Groenigen, J.W., van Kessel, C., Hungate, B.A., Oenema, O., Powlson, D.S., van Groenigen, K.J. (2017):** Sequestering Soil Organic Carbon: A Nitrogen Dilemma. Environmental Science & Technology 51, 4738–4739. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b01427>

**van Lützow, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Flessa, H., Guggenberger, G., Matzner, E., & Marschner, B. (2007):** SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. Soil Biology and Biochemistry, 39(9), 2183-2207.

**VDLUFA (2014):** Humusbilanzierung

**Wachendorf, Bürkert und Graß (2018):** Ökologische Landwirtschaft. Stuttgart. Verlag Eugen Ulmer.

**West, T.O., Post, W.M. (2002):** Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation: A Global Data Analysis. Soil Science Society of America Journal 66, 1930–1946. <https://doi.org/10.2136/sssai2002.1930>

**West, T.O., Post, W.M. (2002):** Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation: A Global Data Analysis. Soil Science Society of America Journal 66, 1930–1946. <https://doi.org/10.2136/sssai2002.1930>

**Wiesmeier, M. (2021):** CO<sub>2</sub>-Zertifikate im Blick. BLW 3-2021

**Wiesmeier, M., Mayer, S., Burmeister, J., Hübner, R., Kögel-Knabner, I. (2020):** Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios. Geoderma 369, 114333. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114333>

**Wiesmeier, M., Schad, P., von Lützow, M., Poeplau, C., Spörlein, P., Geuß, U., ... & Kögel-Knabner, I. (2014):** Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil

units and land uses in southeast Germany (Bavaria). Agriculture, ecosystems & environment, 185, 208-220.

**Wiesmeier, M., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Haug, S., Reischl, A., Schilling, B., von Lützw, M., Kögel-Knaber, 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.

**Wittwer, R., Dorn, B., Jossi W., Zihlmann U. und van der Heijden, M. (2013):** Zwischenfrüchte als wichtiges Puzzlestück für den pfluglosen ökologischen Landbau. Vortrag at: 12. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn, 5. bis 8. März 2013.

**Patzel, N. und Wilhelm, B. (2018):** Das Boden-Bulletin: Landbau in Zeiten der Erderhitzung. World Wildlife Fund for Nature Deutschland (Hrsg.), Berlin 2018

**Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H. und Zheng, C. (2007):** Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. Fuel 86, 1781-1788,

**Zechmeister-Boltenstern S, Keiblinger K.M., Mooshammer M, Penuelas J, Richter A, Sardans J, and Wanek W. (2015):** The application of ecological stoichiometry to plant microbial soil organic matter transformations. Ecological Monographs 85 (2), 133–155; <http://dx.doi.org/10.1890/14-0777.1>

**Zhang, B., Zhang, L. und Zhang, X. (2019):** Bioremediation of petroleum hydrocarbon-contaminated soil by petroleum-degrading bacteria immobilized on biochar. RSC Advances 9, 35304,

**Zhang, P., Huang, P., Xu, X.J., Sun, H.W., Jiang, B. und Liao, Y.H. (2020):** Spectroscopic and molecular characterization of biochar-derived dissolved organic matter and the associations with soil microbial responses. Science of the Total Environment 708, 134619,

**Zheng, Q., Hu, Y., Zhang, S., Noll, L., Böckle, T., Richter, A., & Wanek, W. (2019):** Growth explains microbial carbon use efficiency across soils differing in land use and geology. Soil Biology and Biochemistry, 128, 45-55.

**Zimmermann, M., Leifeld, J., Schmidt, M. W. I., Smith, P., & Fuhrer, J. (2007):** Measured soil organic matter fractions can be related to pools in the RothC model. *European Journal of Soil Science*, 58(3), 658-667.

## 8 Bodenkundliches Glossar

**Aggregate.** Dreidimensionale Strukturen, die durch bodenbildende Prozesse aus mineralischen und organischen Bestandteilen in Böden entstanden sind. Tragen zur natürlichen Lagerung der Böden bei. Tragen zur → Stabilisierung von Humus im Boden bei.

**Anionen.** Negativ geladene Ionen. Bodenchemisch relevante Anionen sind zum Beispiel Sulfat ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), Nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ), Phosphat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) oder Chlorid ( $\text{Cl}^-$ ).

**Basen.** Chemische Stoffe, die in Wasser basisch wirken, also eine Erhöhung des → pH-Werts bewirken. Eine starke Base ist zum Beispiel Natriumhydroxid ( $\text{NaOH}$ ), welche bei der traditionellen chemischen Analyse von → Humus zum Einsatz kommt. In der Bodenchemie sind damit im Allgemeinen die basisch wirkenden → Kationen Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Kalium ( $\text{K}^+$ ), Kalzium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) und Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) gemeint.

**Basensättigung.** Relativer Anteil der basisch wirkenden → Kationen am → Sorptionskomplex.

**Bodenart.** Das Masseverhältnis von → Sand, → Schluff und → Ton eines Bodens. Grundlegende physikalische Bodeneigenschaft, die viele andere Bodeneigenschaften beeinflusst (z. B. Speichervermögen für Wasser, Nährstoffe und Humus, Durchlüftung, Aggregat-Bildung). Wird im Labor durch Siebung und Sedimentation bestimmt. Ein ausgeglichenes Verhältnis von Sand, Schluff und Ton führt zur Bodenart → Lehm. In der Praxis werden verschiedene Masseverhältnisse zu Bodenartenklassen zusammengefasst, z. B. sandiger Schluff, schluffiger Lehm oder lehmiger Ton.

**Bodenhorizont.** Oberflächen-parallele, meist horizontale Schicht innerhalb eines Bodenprofils mit in engen Grenzen variierenden Eigenschaften (Farbe, Struktur, Durchwurzelung, Carbonatgehalt, Grobanteil, usw.). Horizonte erhalten Buchstaben (z. B. A-Horizont, B-Horizont, C-Horizont, P-Horizont, ...).

**Bodentextur.** Fachbegriff für → Bodenart.

**Bodenspektroskopie.** Verfahren zur Analyse von Reflexionseigenschaften von Böden im nahen und mittleren Infrarotbereich.

**Bodentyp.** Name des Bodens. Wird in der Regel je nach dem Vorhandensein einer charakteristischen Abfolge von → Bodenhorizonten festgelegt. Wichtige Systeme zur Benennung von Böden sind die Österreichische Bodensystematik, die World Reference Base for Soil Resources (WRB-FAO) sowie die Soil Taxonomy (US Department of Agriculture).

**C/N-Verhältnis.** Verhältnis von → Organischem Kohlenstoff zu → Stickstoff in einem organischen Material. Wichtige Kenngröße für die chemische Abbaubarkeit von organischem Material.

**$\text{CO}_2$ .** Chemische Summenformel des Gases Kohlendioxid. Dient Pflanzen als Nährstoff welcher in der → Photosynthese zum Aufbau von Biomasse verwendet wird. Gleichzeitig wichtigstes vom Menschen beeinflusstes Treibhausgas in der Erdatmosphäre.

**Dauerhumus.** Jene Bestandteile des → Humus mit relativ langer → Verweilzeit im Boden (Jahrhunderte bis Jahrtausende). Trägt durch den langsamen Abbau kaum direkt zur Pflanzenernährung

bei, ist jedoch für viele andere Bodeneigenschaften von großer Bedeutung (Speicherfähigkeit von Wasser und Nährstoffen, Bodenstruktur, Aggregat-Bildung). Siehe auch → Nährhumus.

**Detritosphäre.** Bereich im Boden rund um absterbende bzw. abgestorbene Organismen, vor allem Pflanzenwurzeln. In der Regel gekennzeichnet durch höhere mikrobielle Abbauraten.

**Exsudate.** Verschiedene Stoffe, die von Pflanzen über die Wurzeln in den Boden abgegeben werden. Dazu gehören typischerweise Zucker, Aminosäuren, → organische Säuren, aber auch Enzyme und Botenstoffe. Pflanzen geben in der Regel zwischen ein und zwei Drittel ihrer → Photosynthese-Produkte als Exsudate in den Wurzelraum ab.

**Freie partikuläre organische Substanz (fPOM).** Im Boden frei vorliegender → Humus, der nicht in → Aggregaten eingeschlossen oder an Mineraloberflächen angelagert ist. Siehe auch → Okkludierte partikuläre organische Substanz.

**Fulvosäuren.** Nach traditionellem Verständnis neben → Huminsäuren und → Huminen ein Hauptbestandteil von → Humus. Wird durch chemische Fraktionierung aus Böden gewonnen und ist jener Bestandteil der durch die Zugabe starker → Basen löslich ist und anschließender Zugabe von → Säuren (pH<2) löslich bleibt.

**Humine.** Nach traditionellem Verständnis neben → Fulvosäuren und → Huminsäuren ein Hauptbestandteil von → Humus. Wird durch chemische Fraktionierung aus Böden gewonnen und ist jener Bestandteil der nach der Zugabe starker → Basen unlöslich bleibt.

**Huminsäuren.** Nach traditionellem Verständnis neben → Fulvosäuren und → Huminen ein Hauptbestandteil von → Humus. Wird durch chemische Fraktionierung aus Böden gewonnen und ist jener Bestandteil der durch die Zugabe starker → Basen und anschließender Zugabe von → Säuren (pH<2) ausfällt.

**Huminstoffe.** Überbegriff für → Fulvosäuren, → Huminsäuren und → Humine. Nach traditionellem Verständnis Hauptbestandteile von → Humus. Nach neueren Erkenntnissen jedoch im Boden nur von untergeordneter Bedeutung.

**Humus.** Organische Bodensubstanz im engeren Sinn. Von und durch Lebewesen (Tiere, Pflanzen, Mikroorganismen) in den Boden eingebrachtes, abgestorbenes organisches Material in den verschiedenen Stadien seiner Zersetzung.

**Humusgehalt.** Anteil des Humus an der trockenen Bodenmasse. Wird meist aus dem Gehalt an → organischem Kohlenstoff mittels traditionellem Umrechnungsfaktor errechnet:  $\text{Humus} = C_{\text{org}} \cdot 1,724$ . Dieser über hundert Jahre alte Faktor sollte nach neueren Erkenntnissen nicht mehr verwendet werden bzw. wenn nötig durch den Faktor 2 ersetzt werden.

**Hydrokohle.** Festes Produkt der hydrothermalen oder vapo-thermalen Karbonisierung, abgekürzt als HTC bzw. VTC bezeichnet. Die chemischen und anwendungstechnischen Eigenschaften dieser Produkte können von Biokohle abweichen, der Einsatzzweck kann sich aber mit den Anwendungsformen von Biokohle überschneiden.

**Kohlenstoffvorrat.** Auch: Humusspeicher, Humuspool. Humusmasse bezogen auf ein bestimmtes Speichervolumen. Zum Beispiel der Humusvorrat pro Quadratmeter bezogen auf 30 cm Bodentiefe.

**In vivo Abbaupfad.** Entstehungsweg von → Humus durch die Anreicherung von mikrobiellen Ausscheidungen und mikrobieller → Nekromasse im Boden. Nach neueren Erkenntnissen ein wichtiger Bildungsweg für → Humus in natürlichen Böden.

**Infiltration.** Das Eindringen von Niederschlägen in den Boden. Gemessen als Millimeter pro Sekunde bzw. Millimeter pro Minute.

**Kationen.** Positiv geladene Ionen. Bodenchemisch relevante Kationen sind zum Beispiel die basisch wirkenden Kationen Natrium ( $\text{Na}^+$ ), Kalium ( $\text{K}^+$ ), Kalzium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) und Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ ) sowie die sauer wirkenden Kationen Wasserstoff (Protonen =  $\text{H}^+$ ), Eisen ( $\text{Fe}^{3+}$ ), Mangan ( $\text{Mn}^{3+}$ ) und Aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ).

**Kationenaustauscherkapazität (KAK).** Die Fähigkeit des → Sorptionskomplexes → Kationen reversibel festzuhalten und bei Bedarf an die Bodenlösung abzugeben. Gebräuchliche Maßeinheit ist Zentimol Ladung pro kg Boden ( $\text{cmol}_c/\text{kg}$ ).

**Kohlenstoff.** Grundbestandteil organischen Materials, und daher aller Organismen. Weitere wichtige Vorkommen in Kalkgesteinen und als →  $\text{CO}_2$  in der Luft.

**Kohlenstoffsequestrierung.** Festlegung von Kohlenstoff in einem anderen Kohlenstoffreservoir als in der Atmosphäre

**Lagerungsdichte.** Auch: Trockenrohdichte, Feinbodendichte. Physikalische Eigenschaft von Böden, die die Lagerung ihrer Bestandteile im natürlichen Zustand beschreibt. Gemessen als trockene Bodenmasse pro Bodenvolumen. Beeinflusst u.a. durch Ausgangsmaterial, die Bodenbildung (im Speziellen durch die Bildung von → Aggregaten) sowie die Bewirtschaftung. Wichtige Größe zur Berechnung von → Humusvorräten.

**Lehm.** Bodenart mit ausgeglichenem Verhältnis von → Sand, → Schluff und → Ton.

**Lignin.** Komplexe, kohlenstoffreiche chemische Verbindung, die ausschließlich von höheren Pflanzen gebildet wird. Dient dort v.a. zur Stabilisierung des Sprosses durch Verholzung der Zellwände. Nach Zellulose die zweithäufigste organische Verbindung der Erde. Nach Absterben der Pflanze im Boden schwer abbaubar, weil chemisch komplex und arm an → Stickstoff.

**Makroaggregate.** Bodenaggregate mit einem Durchmesser von mehr als 0,25 Millimeter.

**Mikroaggregate.** Bodenaggregate mit einem Durchmesser von weniger als 0,25 Millimeter.

**Mineral-assoziierte organische Substanz.** Jener Teil des → Humus welcher mit Mineralien vergesellschaftet ist und daher nach Dichtezentrifugation in der schweren Fraktion zu finden ist.

**Nährhumus.** Jene Bestandteile des → Humus mit relativ kurzer → Verweilzeit im Boden (Wochen bis Monate). Trägt durch raschen Abbau direkt zur Pflanzenernährung bei. Siehe auch → Dauerhumus.

**Nekromasse.** Gesamtheit der abgestorbenen Reste von Lebewesen. Im Zusammenhang mit der Humusbildung ist besonders die Nekromasse von Bodenmikroorganismen von Bedeutung.

**Okkludierte partikuläre organische Substanz (oPOM).** In → Aggregaten eingeschlossener → Humus. Siehe auch → Freie partikuläre organische Substanz.

**Organische Bodensubstanz, im engeren Sinn.** → Humus.

**Organische Bodensubstanz, im weiteren Sinn.** Die Gesamtheit des organischen Materials im Boden, also → Humus sowie lebende Bodentiere, lebende Pflanzenwurzeln und lebende Mikroorganismen.

**Organische Säuren.** Organische Verbindungen, die in Wasser sauer wirken, also eine Erniedrigung des → pH-Werts bewirken. Beispiele sind Essigsäure, Äpfelsäure, oder Zitronensäure. Werden von Pflanzen gemeinsam mit Zuckern und Aminosäuren über die Wurzeln in den Boden abgegeben (→ Exsudate).

**Organischer Kohlenstoff ( $C_{org}$ , SOC).** → Kohlenstoff in organischen Bindungen. Also im Wesentlichen alle Formen von Biomasse, nicht jedoch Kalkgestein oder →  $CO_2$ . Im Boden wichtiger Bestandteil von → Humus. Wird in der Praxis oft als Maß für den → Humusgehalt bestimmt ( $Humus = C_{org} * 1,724$ ), wenngleich diese Umrechnung mit Unsicherheiten behaftet ist.

**Partikuläre organische Substanz, (POM).** Jener Teil des → Humus welcher nicht mit Mineralien vergesellschaftet ist und daher nach Dichtezentrifugation in der leichten Fraktion zu finden ist.

**Pedogene Hydroxide** → Pedogene Oxide.

**Pedogene Oxide.** Sauerstoffhaltige Verbindungen von Eisen, Mangan, Aluminium oder Silizium, welcher im Zuge der Bodenbildung entstehen. Können ein Kristallgitter ausbilden (Goethit, Gibbsite), müssen es aber nicht (Ferrihydrit, Bohemite). Mitverantwortlich für Farbenvielfalt von Böden (gelb, braun, rot, schwarz). Neben → Tonmineralen wichtige Bestandteile von → Mikroaggregaten.

**Penetrometer.** Gerät zur Bestimmung des Eindringwiderstandes.

**Photosynthese.** Der bemerkenswerte biochemische Prozess, durch welchen grüne Pflanzen in der Lage sind aus Sonnenlicht, Wasser, Kohlendioxid (→  $CO_2$ ) unter der Abgabe von Sauerstoff zunächst Zucker und in der Folge Biomasse aufzubauen. Grundlage allen höheren Lebens auf der Erde.

**pH-Wert.** Maß für die Protonenkonzentration in wässrigen Lösungen. Bereich von 0 (sehr sauer) über 7 (neutral) bis zu 14 (sehr basisch). Wichtige Randbedingung für viele (bio-)chemische Prozesse, auch im Boden.

**Rhizosphäre.** Der direkt von Wurzeln beeinflusste Bereich des Bodens. Durch die Aktivität und → Exsudate der Wurzeln in chemischer, physikalischer und biologischer Sicht deutlich anders als der restliche Boden. Zone erhöhter mikrobieller Aktivität.

**Pyrolyse.** Thermochemische Umwandlung von Biomasse in Sauerstoff-limitierter Umgebung.

**Sand.** Mineralische Bodenbestandteile mit einem Durchmesser zwischen 0,063 und 2 Millimeter.

**Säuren, Mineral-.** Chemische Verbindungen, die in Wasser sauer wirken, also eine Erniedrigung des → pH-Werts bewirken. Wichtige Mineralsäuren sind Salzsäure (HCl), Schwefelsäure ( $H_2SO_4$ ) und Phosphorsäure ( $H_3PO_4$ ).

**Schwarzbrache.** Boden ohne Bedeckung von Pflanzen.

**Schluff.** Mineralische Bodenbestandteile mit einem Durchmesser zwischen 0,002 und 0,063 Millimeter.

**Sorption.** Reversible Anlagerung von Stoffen an (oft geladene) Oberflächen.



**Sorptionskomplex.** Auch: Austauscherkomplex. Oberflächeneigenschaft von festen Bodenbestandteilen, welche den reversiblen Austausch von Stoffen mit der Bodenlösung ermöglicht. Hauptsächlich begründet in den negativen Oberflächenladungen von → Tonmineralen und → Humus.

**Stabilisierung.** Allgemein Schutz von Stoffen durch chemische und physikalische Mechanismen vor Abbau bzw. Zerfall. Im Boden relevant für die Beständigkeit/den Erhalt von → Humus.

**Stickstoff.** Mengenmäßig größter Bestandteil der Luft. In Organismen essentiell für die Eiweißbildung. Im Boden wird üblicherweise der Gesamt-Stickstoff als Teil des → Humus bestimmt. Siehe auch → C/N-Verhältnis.

**Supramolekular.** Strukturen über der molekularen Ebene.

**Ton.** Mineralische Bodenbestandteile mit einem Durchmesser kleiner als 0,002 Millimeter.

**Tonminerale.** Minerale die kleiner als 0,002 Millimeter sind. Bestimmen auf Grund ihrer großen Oberfläche viele Bodeneigenschaften. Gemeinsam mit der → Mineral-assoziierten organischen Substanz wichtig für die langfristige → Stabilisierung von → Humus.

**Vergaserkohle.** Fester Rückstand der Vergasung von Biomasse. Als Biomassevergasung wird eine thermo-chemische Umwandlung von Biomasse in ein brennbares Produktgas (Brenngas) mit Hilfe eines Vergasungs- oder Oxidationsmittels (meist Luft, Sauerstoff, Kohlendioxid oder Wasserdampf) bezeichnet.

**Wasserhaltekapazität.** Fähigkeit eines Bodens Wasser gegen die Schwerkraft zu halten. Abhängig unter anderem von der → Bodenart und dem → Humusgehalt.

## Abkürzungen

|       |                                             |
|-------|---------------------------------------------|
| Abk.  | Abkürzung                                   |
| Art.  | Artikel                                     |
| BGBI. | Bundesgesetzblatt                           |
| BWSB  | Boden.Wasser.Schutz.Beratung                |
| FIBL  | Forschungsinstitut für biologischen Landbau |
| LAKO  | Landwirtschaftliche Koordinationsstelle     |
| LKÖ   | Landwirtschaftskammer Österreich            |
| usw.  | und so weiter                               |

**Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Regionen und Wasserwirtschaft**

Stubenring 1, 1010 Wien

[bml.gv.at](http://bml.gv.at)