



UNIVERSITÄT
HOHENHEIM

**Potentialanalyse des Pflanzenproduktionssystems NEXAT unter
besonderer Berücksichtigung aktueller pflanzenbaulicher
Herausforderungen und möglicher Anpassungsstrategien**

Christian Arnold

Matrikelnummer: 864462

Masterarbeit im wissenschaftlichen Studiengang Agrarwissenschaften an der
Universität Hohenheim, Fakultät für Agrarwissenschaften

Studienrichtung: Pflanzenproduktionssysteme

Abgabetermin: 16.07.2023

1. Prüfer: Herr Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Karlheinz Köller

2. Prüfer: Herr Dipl. Ing. Klemens Kalverkamp

Angefertigt am Institut für Agrartechnik, Verfahrenstechnik in der Pflanzenproduktion

Zusammenfassung

Der Agrarsektor steht vor einer großen Herausforderung: Zum einen wird die Nachfrage nach Nahrungsmitteln in den nächsten Jahren auf Grund der stetig wachsenden Weltbevölkerung drastisch steigen und zum anderen verändern sich die gesellschaftlichen als auch politischen Rahmenbedingungen der Lebensmittelproduktion, was sich in einem veränderten Verbraucherbewusstsein und der Forderung die Umweltauswirkungen der landwirtschaftlichen Produktion zu begrenzen widerspiegelt. Um zukünftig die Ernährungssicherheit gewährleisten zu können als auch wettbewerbsfähig zu bleiben, müssen landwirtschaftliche Betriebe also die Nahrungsmittelproduktion steigern und gleichzeitig die Umweltauswirkungen der Produktion verringern. Die Ansätze und Methoden der „Regenerativen Landwirtschaft“ werden häufig als eine vielversprechende Lösung angeführt, um die eingangs beschriebene Problematik anzugehen. Deshalb wird in dieser Untersuchung eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um die Ansätze und Methoden der „Regenerativen Landwirtschaft“ mit wissenschaftlich fundierten Artikeln und Untersuchungen zu überprüfen. Anschließend werden die Erkenntnisse der Literaturrecherche zusammenfassend dargestellt und versucht allgemeine Handlungsempfehlungen für eine nachhaltigere und produktivere Landbewirtschaftung abzuleiten. Zudem wird diskutiert, inwiefern das neuartige Pflanzenproduktionssystem „NEXAT“ zu der erforderlichen Anpassung der Landbewirtschaftung beitragen kann.

Schlüsselwörter: Sustainable Intensification, Soil Health, Soil Compaction, Bare Ground, Soil Organisms, Organic Carbon, Glomalin, Cover Crops, No-till, Widespan-CTF

Abstract

The agricultural sector is facing a major challenge: on the one hand, the demand for food will increase dramatically in the coming years due to the steadily growing world population and, on the other hand, the social and political framework conditions of food production are changing, which is reflected in a change in consumer awareness and the demand to limit the environmental impact of agricultural production. In order to ensure food security in the future and to remain competitive, farms must increase food production and at the same time reduce their environmental impact. The approaches and methods of "regenerative agriculture" are often cited as a promising solution to address the issues described at the outset. Therefore, this study conducts a comprehensive literature review to examine the approaches and methods of "regenerative agriculture" with scientifically based articles and research. Subsequently, the findings of the literature review are summarized and an attempt is made to derive general recommendations for action for more sustainable and productive land management. In addition, it is discussed to what extent the novel crop production system "NEXAT" can contribute to the necessary adaptation of land management.

Keywords: Sustainable Intensification, Soil Health, Soil Compaction, Bare Ground, Soil Organisms, Organic Carbon, Glomalin, Cover Crops, No-till, Widespan-CTF

Sperrvermerk

Die vorliegende Masterarbeit mit dem Titel

„Potentialanalyse des Pflanzenproduktionssystems NEXAT unter besonderer Berücksichtigung aktueller pflanzenbaulicher Herausforderungen und möglicher Anpassungsstrategien“

enthält vertrauliche Daten des Unternehmens Kalverkamp Maschinenbau GmbH. Die Veröffentlichung, Vervielfältigung und Einsichtnahme von Passagen sind nur mit ausdrücklicher Genehmigung des Verfassers, der Universität Hohenheim und des Unternehmens gestattet. Der Projektbericht als Ganzes ist nur den Gutachtern und den Mitgliedern des Prüfungsausschusses zugänglich zu machen, die hiermit auf ihre Pflicht zur Vertraulichkeit hingewiesen werden.

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|------------|
| Abkürzungsverzeichnis | VII |
| Abbildungsverzeichnis | IX |
| Tabellenverzeichnis | XI |
| 1 Einleitung | 1 |
| 2 Vorstellung der Firma Kalverkamp Maschinenbau GmbH | 3 |
| 3 Aktuelle Herausforderungen im konventionellen Pflanzenbau | 4 |
| 3.1 Umweltauswirkungen von temporären Schwarzbrachen..... | 4 |
| 3.2 Bodenschadverdichtung – Eine Hauptursache der Bodendegradierung..... | 7 |
| 3.3 Auswirkungen von chemischen Dünge- und Pflanzenschutzmitteln auf das Bodenleben | 17 |
| 4 Die Effekte eines gesunden Bodens | 25 |
| 4.1 Das Bodenleben als zentraler Indikator für die Bodengesundheit..... | 26 |
| 4.2 Erhalt und Aufbau von Humus | 34 |
| 4.3 Glomalin als bedeutende Substanz für die Bodenstruktur..... | 43 |
| 4.4 Erhöhte Wasserinfiltration – Das Ergebnis eines gesunden Bodens | 46 |
| 5 Anpassungsstrategien des zukunftsorientierten Pflanzenbaus zur Förderung der Bodengesundheit | 49 |
| 5.1 Der Effekt von Zwischenfruchtanbau auf Bodenlebewesen..... | 50 |
| 5.2 Der Effekt von Zwischenfruchtanbau auf den Humusgehalt..... | 55 |
| 5.3 Intercropping als Maßnahme zur Erhöhung der Pflanzendiversität | 58 |
| 5.4 Direktsaateffekte auf Bodenlebewesen..... | 60 |
| 5.5 Direktsaateffekte auf den Humusgehalt..... | 64 |
| 5.6 Der Einsatz von Biostimulanzen | 68 |
| 5.7 Nutzung von Controlled Traffic Farming..... | 72 |

| | | |
|-----------|--|------------|
| 6 | Material und Methoden zur Identifikation von Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige und profitable Landwirtschaft in Verbindung mit dem Einsatz des NEXAT-Systems | 89 |
| 6.1 | Leitende Forschungsfrage | 89 |
| 6.2 | Vorgehensweise der Literaturrecherche | 89 |
| 7 | Ergebnisse der Untersuchung | 92 |
| 7.1 | Auswirkungen von Bodenschadverdichtungen | 92 |
| 7.2 | Die zentralen Bestandteile und Prozesse eines gesunden Bodens | 96 |
| 7.3 | Der erforderliche Paradigmenwechsel zur Umsetzung der nachhaltigen Intensivierung | 103 |
| 8 | Diskussion..... | 114 |
| 9 | Fazit | 119 |
| 10 | Literaturverzeichnis | 121 |
| 11 | Glossar | 134 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|---|---|
| AM | Arbuskuläre Mykorrhizae |
| AoA | Ammoniak/Ammonium-oxidierenden-Archaeen |
| BB | Bodenbearbeitung |
| C | Kohlenstoff |
| C:N-Verhältnis | Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnis |
| ca. | circa |
| CH ₄ | Methan |
| C _{org} | Organischer Kohlenstoff |
| CT | Conventional Tillage |
| CTF | Controlled Traffic Farming |
| etc. | et cetera |
| g | Gramm |
| H ₂ PO ₄ ⁻ | Dihydrogenphosphat |
| ha | Hektar |
| HÄQ | Humusäquivalente |
| HPO ₄ ²⁻ | Hydrogenphosphat |
| l | Liter |
| m ² | Quadratmeter |
| m ³ | Kubikmeter |
| mg | Milligramm |
| min. | Minute |
| Mio. | Millionen |
| mm | Millimeter |

| | |
|------------------|---|
| MO | Mikroorganismen |
| N | Stickstoff |
| N ₂ O | Lachgas |
| NH ₃ | Ammoniak |
| Nmin | Mineralischer Stickstoff |
| NT | No-Till |
| O ₂ | Sauerstoff |
| OS | Organische Substanz |
| P | Phosphor |
| PGPR | Plant Growth-Promoting Rhizobacteria |
| ppm | parts per million |
| PSM | Pflanzenschutzmittel |
| RTF | Random Traffic Farming |
| RTK-GNSS | Real Time Kinematics – Global Navigation Satellite System |
| SCS | Soil Carbon Sequestration |
| u. | und |
| WS | Widespan |
| z.B. | zum Beispiel |
| ZF | Zwischenfrucht |

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Druckzwiebeln unterschiedlich breiter Reifen mit unterschiedlichen Reifeninnendrücken bei gleicher Radlast

Abbildung 2: Die Beziehung zwischen der applizierten N-Menge und dem Ertrag bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad des Bodens

Abbildung 3: Der Effekt unterschiedlicher Managementstrategien von Bodenverdichtungen auf den Unternehmensgewinn

Abbildung 4: Globale Angebot und Nachfrage Beziehung von Phosphordüngemitteln in einem „business-as-usual“ Szenario

Abbildung 5: Der Effekt von unterschiedlichen Konzentrationen des Insektizids Imidacloprid auf das Grabeverhalten von zwei Regenwurmarten

Abbildung 6: Parameter der Bodengesundheit

Abbildung 7: Wege des Kohlenstoffs in den Boden

Abbildung 8: Anhäufung, Abbau und Umsatz nach jährlicher Zufuhr einer gleichbleibenden Menge an organischer Substanz im Boden

Abbildung 9: Einflussgrößen der Zufuhr und des Abbaus von C_{org}

Abbildung 10: Globale C-Vorräte im Oberboden (0-30 cm Tiefe) in Tonnen C pro Hektar

Abbildung 11: Schematische Darstellung der Haupteffekte von AM und Glomalin auf Boden und Pflanzen

Abbildung 12: Beziehung der Regenwurmbiomasse und der gesättigten Wasserleitfähigkeit

Abbildung 13: Abiotische und biotische Faktoren mit Einfluss auf das Bodenleben

Abbildung 14: Variation (%) der mikrobiellen Parameter unter Leguminosen (Blaue Lupine + Zottige Wicke) verglichen mit Gräsern (Hafer + Winterweizen)

Abbildung 15: Bandbreite der Humifizierungskoeffizienten (HÄQ) der Fruchtarten

Abbildung 16: Einfluss des Bodenbearbeitungssystems auf die C_{org} -Gehalte in unterschiedlicher Bodentiefe

Abbildung 17: Veränderungen des C_{org} -Gehaltes nach 5 Jahren unterschiedlicher BB + ZF-Anbau

Abbildung 18: CTF-System mit 9m Basisarbeitsbreite, 27m Bestandespflege und 3m Spurweite

Abbildung 19: OutTrac-System mit 8m Basisarbeitsbreite, 24m Bestandespflege und zwei verschiedenen Spurweiten (2,7m Mährescher) (2,2m Traktor etc.)

Abbildung 20: Binäre Bilder der Bodenstruktur in einem Vertisol bis 24 cm Bodentiefe. (a) zeigt das Bodenprofil unter CTF-Direktsaat und (b) das Bodenprofil unter RTF-Direktsaat bei gleicher Fruchtfolge.

Abbildung 21: Effekte von verschiedenen BB-Varianten und Befahrungsintensitäten auf die Wasserinfiltration und Regenwurmabundanz in einem Vertisol

Abbildung 22: Ertragszuwachs verschiedener Fruchtarten durch Umstellung von RTF auf CTF. Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf die Studienanzahl von denen Daten genutzt wurden

Abbildung 23: Emissionen angegeben in CO_2 -Äquivalenten von Mulch Till (Reduzierte BB + RTF), No-Till/Traffic System (Direktsaat + RTF) und CTF (Direktsaat + CTF)

Abbildung 24: Konzept eines WS-Fahrzeuges von Dowler aus den 1980er Jahren

Abbildung 25: Konventioneller Fuhrpark im Vergleich mit einem WS-System

Abbildung 26: Bruttomarge und Treibhausgasemissionen angegeben in $kg CO_2$ -Äquivalente einer modellierten Fallstudie in einer tasmanischen Gemüsefruchtfolge

Abbildung 27: Vergleich Spurflächenanteil RTF und WS-CTF mit NEXAT

Abbildung 28: Das NEXAT WS-Fahrzeug der dritten Generation

Abbildung 29: Modulwechsel des NEXAT-Systems

Abbildung 31: Schematische Darstellung eines gesunden Bodens

Abbildung 32: Die drei zentralen Maßnahmen zur Umsetzung der nachhaltigen Intensivierung

Abbildung 33: Vorteile des NEXAT Widespan-CTF-Systems

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswirkungen einer Erhöhung des Versorgungsgrades mit OS vom Niveau der Unterversorgung (= 100 %) auf einen guten bis sehr guten Versorgungszustand (um ca. + 500 kg Humusäquivalente (HÄQ) / ha) auf physikalische, chemische und biologische Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit

Tabelle 2: Einfach zu extrahierendes Glomalin (EE-GRSP) und Gesamt Glomalin (T-GRSP) in unterschiedlichen Bodentiefen nach 23 Jahren Winterkulturen in Direktsaat (NT) und konventioneller BB mit Pflug (CT)

Tabelle 3: Umsatzsteigerungen als Ergebnis von Ertragszuwächsen verschiedener CTF-Systeme

1 Einleitung

Im Zuge der „Grünen Revolution“ wurde die Produktivität im Pflanzenbau ab Mitte des 20. Jahrhunderts stetig gesteigert. Die Zunahme der Nahrungsmittelproduktion war auf globaler Ebene zu beobachten und ist insbesondere Maßnahmen wie der Züchtung von Hochertragsorten, dem zunehmenden Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln und mineralischen Düngemitteln, dem Ausbau der Flächenberegnung sowie der Entwicklung und Optimierung von Landmaschinen zuzuschreiben (JOHN U. BABU, 2017: 1). Das übergeordnete Ziel der „Grünen Revolution“ war die Ertragsmaximierung, wobei potenziellen negativen Umweltauswirkungen durch zum Beispiel Nährstoffüberschüsse oder sich akkumulierenden Pestizidrückständen im Boden wenig Beachtung geschenkt wurde (JOHN U. BABU, 2017: 1).

Aktuelle Schätzungen sagen voraus, dass die Weltbevölkerung bis zum Jahr 2050 von heute 8 Milliarden Menschen auf 9,5 bis 10 Milliarden Menschen anwachsen wird. Demnach könnte die Nachfrage nach Nahrungsmitteln um 70 % ansteigen, was insbesondere durch den zunehmenden Verzehr von tierischen Erzeugnissen in Entwicklungsländern und der damit einhergehenden ressourcenintensiven Futtermittelproduktion begründet wird (POPP ET AL., 2013: 1) (DUBEY ET AL., 2019: 2). Auf der anderen Seite haben steigende Einkommen und Entwicklungen wie Urbanisierung und Globalisierung, insbesondere in Industrienationen, zu einer erhöhten Nachfrage nach „nachhaltig erzeugten“ Lebensmitteln geführt, bei deren Produktion eine deutlich geringere Umweltbelastung gefordert wird (DE HAEN U. RÉQUILLART, 2014: 3). Dieser Bewusstseinswandel auf Seiten der Verbraucher spiegelt sich auch in politischen Strategiepapieren wider, die sich mit der Rolle des Agrarsektors im Hinblick auf aktuelle und zukünftige Herausforderungen auseinandersetzen. In der „Farm to Fork“ Strategie, welche von der europäischen Kommission im Jahr 2020 veröffentlicht wurde, werden beispielsweise konkrete Maßnahmen zur nachhaltigen Transformation des Lebensmittelsektors dargestellt. So soll der Pflanzenschutzmitteleinsatz bis 2030 um 50 % und die Nutzung von Düngemitteln um 20 % reduziert werden (EUROPEAN COMMISSION, 2020: 9).

Die zentrale Herausforderung zukünftiger Agrar- und Ernährungssysteme umfasst also die Frage, wie eine nachhaltige Steigerung der landwirtschaftlichen Produktion umgesetzt werden kann: Auf der einen Seite müssen mehr Nahrungsmittel produziert werden, um die

Ernährung der anwachsenden Weltbevölkerung sicherzustellen. Auf der anderen Seite rückt die Art und Weise der Lebensmittelproduktion wegen der gesellschaftlich und politisch veränderten Rahmenbedingungen in den Fokus (HALLER ET AL., 2020: 6). Landwirtschaftliche Betriebe müssen also die Umweltauswirkungen der Landbewirtschaftung reduzieren. Diese zentrale Herausforderung wird durch die Auswirkungen des fortschreitenden Klimawandels verschärft und in der Literatur häufig als „Sustainable Intensification“ (nachhaltige Intensivierung) bezeichnet.

Die sogenannte „Regenerative Landwirtschaft“ ist eine Form der Landbewirtschaftung, die den Boden und dessen Bewohner in den Mittelpunkt aller Betrachtungen stellt und von praktizierenden Landwirten, Beratern und einigen Wissenschaftlern als zentrale Lösung für den eingangs beschriebenen Zielkonflikt angesehen wird. Trotzdem gibt es aus Kreisen der Wissenschaft auch Zweifel an diesem Ansatz, da andere wissenschaftliche Untersuchungen die beschriebenen Vorteile zum Teil nicht beobachten konnten (MÖLLER ET AL., 2022: 8 ff.).

In dieser Arbeit sollen deshalb in einem ersten Schritt die aktuellen Herausforderungen und Lösungsansätze im Pflanzenbau wissenschaftlich fundiert dargestellt werden, wobei sich die Themenauswahl an den Ansätzen der Regenerativen Landwirtschaft orientiert. Nachdem das Pflanzenproduktionssystem NEXAT dann vorgestellt wurde, werden auf Basis der Literaturrecherche Potenziale des Pflanzenproduktionssystems NEXAT in Bezug auf mögliche pflanzenbauliche Anpassungsstrategien dargestellt und allgemein gültige Handlungsempfehlungen gegeben.

2 Vorstellung der Firma Kalverkamp Maschinenbau GmbH

Das Unternehmen Kalverkamp Maschinenbau GmbH wurde 2011 von Felix Kalverkamp zusammen mit seinem Vater Klemens Kalverkamp gegründet und hat sich auf das Angebot professioneller Leistungen im gesamten Bereich der Produktentwicklung spezialisiert. Darüber hinaus werden von dem Unternehmen auch Produktoptimierungen und Wertanalysen abgedeckt, wobei die Landtechnik, erneuerbare Energien sowie die Recycling- und Umwelttechnik zu den Kernbranchen gehört, in denen das Unternehmen tätig ist. Im Bereich der Landtechnik wurde zuletzt das neuartige Pflanzenproduktionssystem „NEXAT“ entwickelt, welches weltweit als Lösung für eine nachhaltigere Landbewirtschaftung vertrieben werden soll und als eigenständige Firma ausgegliedert wurde. Stand 2023 zählen zu dem Unternehmen NEXAT ungefähr 120 Beschäftigte in den Bereichen Forschung und Entwicklung, Produktion, Vertrieb, Service und Verwaltung.

3 Aktuelle Herausforderungen im konventionellen Pflanzenbau

In diesem Abschnitt werden die bedeutendsten Probleme der aktuellen konventionellen Landbewirtschaftung aus Sicht der Regenerativen Landwirtschaft behandelt. Dafür werden zunächst die Umweltauswirkungen dargestellt, die maßgeblich durch Landmanagement mit temporären Schwarzbrachen verursacht werden. In diesem Kontext versteht man unter Schwarzbrachen Flächen, die zwischen der Ernte einer Kultur und der darauffolgenden Winter- oder Sommerfruchtaussaat unbewachsen sind. Zusätzlich werden in der Regel mehrere Bodenbearbeitungsgänge durchgeführt, so dass der Boden den Witterungsbedingungen für eine bestimmte Zeit ungeschützt ausgesetzt ist. Dann wird auf den Prozess der Bodenverdichtung und den damit verbundenen Auswirkungen eingegangen und anschließend wird die Nutzung von chemischen Dünge- und Pflanzenschutzmitteln im Kontext des mikrobiellen Bodenlebens untersucht.

3.1 Umweltauswirkungen von temporären Schwarzbrachen

Bodenerosion

Die Erosion von Ackerböden zählt zu den bedeutendsten Prozessen, die für den Verlust von wertvollem Mutterboden verantwortlich sind. Insbesondere Flächen mit geringer oder fehlender Bodenbedeckung sind besonders anfällig, da das organische Material an der Bodenoberfläche die kinetische Energie von Regentropfen und Wind abfängt und den Abfluss und das Forttragen durch Erhöhung der Oberflächenrauigkeit verringert (DUTTMANN U. KUHWALD, 2018: 3) (PIMENTEL U. BURGESS, 2013: 4).

Je nach Standort und Witterung tragen Wasser- und Winderosion in unterschiedlichem Ausmaß zur Gesamterosion bei. Winderosion, also das Forttragen von Bodenpartikeln, setzt ein, wenn die Windgeschwindigkeit so hoch ist, dass die Schub- und Scherkräfte des Windes ausreichen, um Bodenpartikel abzulösen und zu transportieren. Dieser Prozess wird maßgeblich von der Korngrößenzusammensetzung, der Bodenfeuchte, sowie Strukturelementen und Feldlängen in Windrichtung beeinflusst (DUTTMANN U. KUHWALD, 2018: 40 ff.). So sind vor allem sandige Böden mit geringen Gehalten organischer Substanz, geringer Bodenfeuchte und wenigen Strukturelementen, wie beispielsweise Hecken oder

Baumreihen bei einer entsprechenden Flächengröße von Winderosion betroffen. Ein historisches Ausmaß erreichte ein Winderosionsereignis in den 1930er Jahren in den Vereinigten Staaten. Bei der sogenannten „Dust Bowl“ kam es in Folge einer ausgeprägten Dürre in Kombination mit unangepasstem Landmanagement und starkem Wind zu massiven Staubstürmen, wodurch etliche Tonnen fruchtbarer Ackerboden fortgetragen und rund 40.000.000 ha Ackerland langfristig degradiert wurden (LEE U. GILL, 2015: 2) (DACEY, 2009). Abgesehen von solchen Extremereignissen wird das Ausmaß von Winderosionsereignissen jedoch selten der Realität entsprechend wahrgenommen. So können 40 t/ha/Jahr an Feinboden fortgetragen werden, ohne dass deutliche Erosionsspuren sichtbar sind (DUTTMANN U. KUHWARD, 2018: 43).

Weltweit betrachtet ist allerdings Wassererosion die Hauptursache für erodierte Flächen (LI U. FANG, 2016: 3). So wird der Bodenabtrag in Südamerika auf 30-40 t/ha/Jahr, in den USA auf 10-15 t/ha/Jahr und in Europa auf 3,6 t/ha/ Jahr geschätzt (DUTTMANN U. KUHWARD, 2018: 3), wobei die Bodenabtragsrate von Jahr zu Jahr erheblich variieren kann auf Grund von sich ändernden Witterungsbedingungen und Zeitpunkten von Extremwetterereignissen (DUTTMANN U. KUHWARD, 2018: 3). Die am häufigsten genannte tolerierbare Bodenabtragsrate liegt bei 1 t/ha/Jahr, die sich maßgeblich aus der Neubildungsrate von Boden ergibt. Demnach sind die genannten Werte des Bodenabtrages als irreversibler Bodenverlust einzustufen (LI U. FANG, 2016: 3).

Insgesamt können zwei Formen der Wassererosion unterschieden werden. Zum einen die Regentropfen-Erosion und zum anderen die Rinnen-Erosion. Die erosive Wirkung der Regentropfen-Erosion entsteht hauptsächlich durch die kinetische Energie, die beim Aufprall der Regentropfen auf der Bodenoberfläche zur Ablösung von Bodenpartikeln führt. Rinnen-Erosion entsteht, wenn der zunehmende Bodenabfluss zu einer Vertiefung von vorhandenen Kanälen oder Rinnen durch Forttragen von Bodenpartikeln führt (LI U. FANG, 2016: 5). LI U. FANG, 2016: 5 stellen zudem fest, dass bei Starkregenereignissen insbesondere der Wasserinfiltrationsleistung und bei langanhaltenden Niederschlagsereignissen der Wasseraufnahmekapazität des Bodens eine besondere Bedeutung zukommt, um Rinnen-Erosion zu reduzieren. Zu den maßgeblichen Faktoren, die das Ausmaß eines Wassererosionsereignisses bestimmen, gehören die Hangneigung und -länge, die Bodenbedeckung, die Niederschlagsmenge, -intensität und -verteilung, sowie Bodeneigenschaften wie beispielsweise die Wasserinfiltrationsleistung (LI U. FANG, 2016: 2) (DUTTMANN U. KUHWARD, 2018: 6).

In einer Tonne fruchtbarem Oberboden befinden sich zwischen 1-6 Kilogramm Stickstoff, 1-3 Kilogramm Phosphor und 2-30 Kilogramm Kalium (PIMENTEL U. BURGESS, 2013: 8). Bei einem Bodenerosionsereignis können erhebliche Mengen dieser Nährstoffe durch Bodenabfluss in andere Ökosysteme gelangen. In Gewässern beispielsweise führt ein übermäßiger Nährstoffeintrag zu einem angeregten Algenwachstum und damit letztlich zu sauerstoffarmen Bedingungen für Fische und andere aquatische Lebewesen. Andererseits führt Bodenerosion mittel- und langfristig zu einer Abnahme der Bodenfruchtbarkeit, da es zu einem fortschreitenden Abtrag des humosen Oberbodens sowie dem Wurzelraum für Pflanzen kommt. Dieser Prozess spiegelt sich letztlich in einer Abnahme des Nährstoff- und Wasserspeichervermögens wider (DUTTMANN U. KUHWARD, 2018: 9). Zur Veranschaulichung eignet sich die folgende Kalkulation: Bei einer mittleren Lagerungsdichte von $1,3 \text{ g/cm}^3$ kommt es bei einem mittleren Bodenabtrag von 5 t/ha/Jahr innerhalb von 100 Jahren zu einem Krümenverlust von 3 cm (DUTTMANN U. KUHWARD, 2018: 10). PIMENTEL UND BURGESS, 2013: 9 stellen zudem fest, dass sich der Verlust fruchtbaren Bodens negativ auf die Abundanz, Diversität und die biologische Aktivität von Bodenmikroorganismen auswirkt.

Klimaeffekt

JONES, 2019 stellt fest, dass 50 % des weltweiten Ackerlandes innerhalb eines Jahres zumindest für eine gewisse Zeit unbewachsen ist. Dadurch wird insbesondere in den Sommermonaten nach der Ernte das lokale, regionale und sogar globale Klima erheblich beeinflusst (JONES, 2019). Messungen im Jahr 2020 in Texas haben gezeigt, dass sich die Bodenoberfläche von unbewachsenem Boden bei einer Umgebungstemperatur von 105° Fahrenheit ($\sim 41^\circ$ Celsius) auf 155° Fahrenheit ($\sim 68^\circ$ Celsius) aufheizt, während auf der Bodenoberfläche einer benachbarten Fläche, auf der eine Sommerzwischenfrucht angebaut wurde, nur eine Temperatur von 77° Fahrenheit ($\sim 25^\circ$ Celsius) gemessen wurde (JONES, 2019). Diese Temperaturunterschiede an der Bodenoberfläche von bewachsenem und unbewachsenem Boden werden von Jones durch die unterschiedliche Absorptions- und Reflektionseigenschaften der Sonneneinstrahlung erklärt, die durch den Pflanzenbewuchs hervorgerufen werden. So absorbiert der unbewachsene Boden deutlich mehr Sonnenenergie, als der bewachsene Boden und heizt sich deshalb deutlich stärker auf. Dieser enorme Temperaturanstieg führt letztlich zum sogenannten „Heat-Dome-Effekt“, bei dem

der aufgeheizte unbewachsene Boden als Energiequelle zum Erwärmen der Luftmassen dient, die sich nahe der Bodenoberfläche befinden. Dabei entsteht ein Kreislauf, bei dem die aufgeheizte Luft aufsteigt, kühlere Luft nachströmt und erwärmt bis sie auch schließlich aufsteigt (JONES, 2019). Durch die enormen Landmassen, die global betrachtet insbesondere im Sommer unbewachsen sind, kann von einem signifikanten Effekt auf das globale Klima ausgegangen werden.

Ein weiteres Problem in Bezug auf das Klima ergibt sich durch die zunehmende Entstehung von Wasserdampf: Durch die erhöhten Temperaturen an der Bodenoberfläche von unbewachsenen Böden kommt es zu einer zunehmenden Verdunstung von Wasser, also der Entstehung von Wasserdampf (JONES, 2019). In der Atmosphäre sorgt Wasserdampf dann für eine Absorption der von der Erde reflektierten Wärmestrahlung und sorgt dadurch für eine zusätzliche Erwärmung der Atmosphäre, wodurch in der Folge noch mehr Wasserdampf entsteht (BUIS, 2022). Wissenschaftler gehen davon aus, dass Wasserdampf die klimaerwärmende Wirkung von CO₂ mehr als verdoppelt (BUIS, 2022).

3.2 Bodenschadverdichtung – Eine Hauptursache der Bodendegradierung

Ein gesunder Boden sollte ein Porenvolumen von 50 % aufweisen. Dabei sollte das Gesamtporenvolumen zu etwa gleichen Anteilen aus wasser- sowie luftgefüllten Poren bestehen (BAYHAN ET AL., 2002: 1). Jede Bodenverdichtung wirkt sich auf diesen Porenraum aus, der insbesondere für die Versorgung von Pflanzenwurzeln und Bodenlebewesen mit Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen von zentraler Bedeutung ist. Wichtig ist dabei jedoch anzumerken, dass nicht jede Bodenverdichtung negative Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum hat. So wurde in mehreren Untersuchungen festgestellt, dass eine mäßige Bodenverdichtung in Form einer Rückverfestigung der lockeren Ackerkrume sogar zu einer Ertragssteigerung führen kann (O’SULLIVAN U. SIMOTA, 1995: 2) (HAMZA U. ANDERSON, 2005: 4) (ARVIDSSON U. HAKANSSON, 2014: 1). Allerdings wurde dieser Effekt hauptsächlich nach einer intensiven Bodenlockerung mittels Pflug festgestellt. ARVIDSSON U. HAKANSSON, 2014: 1 führen diesen ertragssteigernden Effekt einer mäßigen Bodenverdichtung eines umfassend gelockerten Bodens hauptsächlich auf eine optimierte Wasserleitfähigkeit und einen verbesserten Pflanzenwurzel-Boden Kontakt zurück. Insbesondere bei dem Anbau von [monokotylen Pflanzen](#), wie beispielsweise Weizen oder

Gerste wurde dieser Effekt beobachtet (ARVIDSSON U. HAKANSSON, 2014: 7). Insgesamt muss also zwischen einer mäßigen Bodenverdichtung unterschieden werden, die sich in Folge eines intensiv gelockerten Bodens sogar positiv auf das Pflanzenwachstum auswirken kann und einer Bodenschadverdichtung, deren Vermeidung und Management eine der zentralen Herausforderungen des zukunftsorientierten Pflanzenbaus ist und die im Folgenden behandelt werden soll.

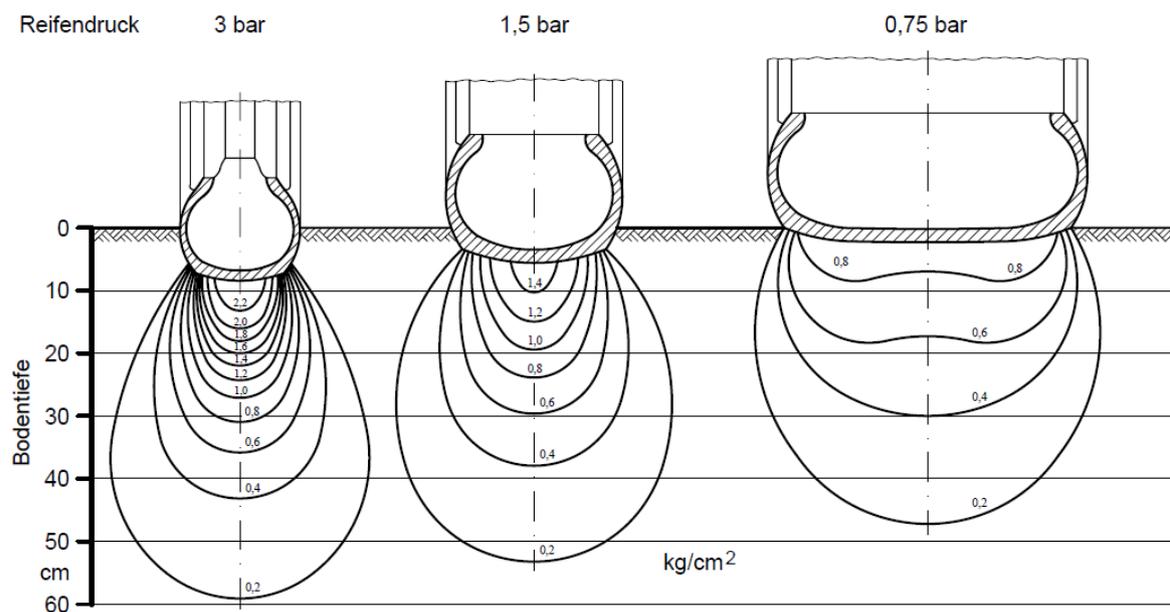
Die durch Internationalisierung der Märkte und dem damit verbunden verschärften Kostendruck hervorgerufenen notwendigen Produktivitätssteigerungen und Kostensenkungen haben in den letzten Jahrzehnten zu dem Einsatz immer leistungstärkerer Technik geführt, die damit verbunden auch immer größer und schwerer wurde (CRAMER, 2006: 16). So wog ein Mähdrescher, wie der Claas Columbus im Jahr 1964 ungefähr 3,1 Tonnen während ein heutiges Modell der oberen Mittelklasse, wie der Claas Lexion 570 ein Gewicht von 24 Tonnen auf die Waage bringt (BRANDHUBER, 2006: 52). Durch die damit verbundenen hohen Radlasten und Kontaktflächendrücke wird der Boden trotz moderner Reifen- und Fahrwerkstechnologien stärker belastet (CRAMER, 2006: 16).

Bodenverdichtung kann als Prozess verstanden werden, bei dem der Porenraum zwischen den Bodenpartikeln reduziert wird, und somit zu einer Zunahme der Lagerungsdichte des Bodens führt (HAMZA U. ANDERSON, 2005: 2). Dieser Prozess geht einher mit einer Veränderung der Bodenstruktur, der Bodenfestigkeit und dem Bodenluftgehalt und kann mit der elastischen Reaktion des Bodens bis zu einer gewissen mechanischen Beanspruchung erklärt werden. Wird der Boden über die Tragfähigkeitsgrenzen hinaus belastet, kommt es zur plastischen Verformung (NAWAZ ET AL., 2013: 2).

Das Ausmaß einer Bodenschadverdichtung wird einerseits durch die technischen Parameter des Fahrzeuges, wie der Radlast, dem Kontaktflächendruck, sowie der Überrollhäufigkeit bestimmt und andererseits durch die Tragfähigkeit des Bodens, die maßgeblich von Faktoren wie der Bodenfeuchte, der Bodenart sowie der Bodenstruktur beeinflusst wird (BRANDHUBER, 2006: 56 ff.). In Bezug auf die technischen Parameter eines Fahrzeuges spielt die Radlast eine herausragende Rolle bei der Tiefenwirkung einer potenziellen Bodenschadverdichtung. Letztendlich bestimmt die Höhe der Radlast mit welchem Gradienten der Druck in der Tiefe abnimmt und damit auch das Ausmaß einer Unterbodenverdichtung.

Um die negativen Auswirkungen einer verdoppelten Radlast abzuschwächen, muss die Aufstandsfläche überproportional vergrößert werden (BRANDHUBER, 2006: 58). Ein weiterer wichtiger Parameter ist der Kontaktflächendruck, der maßgeblich durch die Wirkung einer gegebenen Radlast auf die Kontaktfläche zwischen Reifen/Fahrwerk und Boden definiert wird. Die Kontaktfläche und damit auch der Kontaktflächendruck wird dabei maßgeblich von der Reifenauswahl und dem Reifeninnendruck bestimmt (BRANDHUBER, 2006: 56).

Abbildung 1: Druckzwiebeln unterschiedlich breiter Reifen mit unterschiedlichen Reifeninnendrücken bei gleicher Radlast



Quelle: BRANDHUBER, 2006: 56

Abbildung 1 zeigt den Zusammenhang zwischen der Maximierung der Kontaktfläche durch die Nutzung von Reifen mit einem großen Luftvolumen sowie der Absenkung des Reifeninnendruckes und der damit verbundenen Verminderung der Bodenbeanspruchung. Es gilt also je größer die Kontaktfläche, desto kleiner der Kontaktflächendruck und desto geringer die Bodenbeanspruchung (BRANDHUBER, 2006: 56). Die Überrollhäufigkeit des Bodens beeinflusst hauptsächlich, ob aus einer elastischen und damit vorübergehenden Bodenverformung eine plastische und damit dauerhafte Bodenverformung entsteht, da der Boden bei einer mehrfachen Überrollung innerhalb kurzer Zeit nicht in seine ursprüngliche Form „zurückfedern“ kann (BRANDHUBER, 2006: 60).

Neben den technischen Parametern eines Fahrzeuges spielt auch die Tragfähigkeit der Böden eine entscheidende Rolle, wenn es um die Frage geht, ob eine Bodenschadverdichtung entstehen kann. Hier ist der Bodenwassergehalt der bedeutendste Parameter, da das Wasser

im Boden als Gleitmittel zwischen den Bodenpartikeln fungiert und damit den Reibungswiderstand verringert (BRANDHUBER, 2006: 55). Deshalb wird durch einen steigenden Bodenwassergehalt die Belastbarkeit des Bodens maßgeblich reduziert (HAMZA U. ANDERSON, 2005: 4). Auch die Bodenart wird häufig als eine entscheidende Einflussgröße der Verdichtungsempfindlichkeit von Böden genannt. So bedingt die Korngrößenzusammensetzung von Sandböden einen deutlich höheren Grobporenanteil und damit auch eine leichtere Komprimierbarkeit als zum Beispiel Tonböden mit deutlich höherem Feinporenanteil (BRANDHUBER, 2006: 55). Auf Grund des geringen Anteils an Grobporen verlieren Tonböden jedoch bereits bei einer geringen Verformung ihre Durchlässigkeitsfunktion, so dass letztendlich beide komplett gegensätzlichen Bodenarten als verdichtungsempfindlich einzustufen sind (BRANDHUBER, 2006: 55). Die Bodenstruktur als dritter wichtiger Faktor, der die Tragfähigkeit von Böden bestimmt, kann maßgeblich durch Bewirtschaftungsmaßnahmen, wie reduzierte Bodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau, Humusaufbau, Kalkung und Förderung des Bodenlebens positiv beeinflusst werden (SHAH ET AL., 2017: 5) (HAMZA U. ANDERSON, 2005: 10). Das Ziel dabei ist der Aufbau und Erhalt einer natürlichen Gefügebildung mit einem durchgehenden Porensystem und vergleichsweise kompakter Lagerung der Bodenpartikel (BRANDHUBER, 2006: 55).

Bodenschadverdichtungen haben zahlreiche negative Auswirkungen auf die biologischen, chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens. In dieser Arbeit soll der Fokus hauptsächlich auf den pflanzenbaulichen sowie ökonomischen Effekten liegen. Pflanzenbaulich gesehen werden insbesondere Pflanzenwurzeln, das Bodenleben sowie die Lachgasemissionen von Bodenschadverdichtungen beeinflusst. Auf wirtschaftlicher Seite spielen mögliche Ertragseinbußen, ein erhöhter Düngebedarf und ein ansteigender Energieverbrauch eine entscheidende Rolle.

COLOMBI U. KELLER, 2019: 1 ff. stellen fest, dass eine verminderte Produktivität auf einem verdichteten Standort hauptsächlich aus einer eingeschränkten Ausbreitung des Wurzelsystems und dem damit einhergehenden begrenzten Zugang zu Bodenwasser und Nährstoffvorräten resultiert. Verantwortlich für ein eingeschränktes Wurzelwachstum in verdichteten Böden ist einerseits die Zunahme des Bodeneindringwiderstandes durch Abnahme des Porenvolumens und andererseits die starke Abnahme des Bodensauerstoffgehaltes durch eine verminderte Verbindung und Kontinuität des Porenraums, die besonders für die Leitfähigkeit von Wasser und Luft von zentraler

Bedeutung sind (COLOMBI U. KELLER, 2019: 2) (WHALLEY ET AL., 1995: 3 ff.). Beide Faktoren werden maßgeblich von der Bodenfeuchte beeinflusst, so dass unter trockenen Bedingungen der zunehmende Bodeneindringwiderstand als Hauptursache für das eingeschränkte Wurzelwachstum angesehen werden kann, während unter feuchten Bedingungen der geringe Bodensauerstoffgehalt zum limitierenden Faktor wird (COLOMBI U. KELLER, 2019: 2). Beide Mechanismen führen zu verminderten Wurzelwachstumsraten und einer verspäteten Ausbildung von Seitenwurzeln, so dass die Wasseraufnahme und die Wurzelatmung insbesondere in der obersten Bodenschicht stattfinden. Dadurch kommt es zu einer weiteren Zunahme des Bodeneindringwiderstandes sowie des Sauerstoffmangels im Oberboden (COLOMBI U. KELLER, 2019: 2).

Zahlreiche Untersuchungen belegen den Einfluss einer Bodenschadverdichtung auf die Makro- und Mikrofauna des Bodens. Zu der Makrofauna gehören größere Bodenlebewesen, wie Springschwänze und Regenwürmer während die Mikrofauna hauptsächlich Kleinstlebewesen wie Pilze und Bakterien umfasst.

So stellen WILKE ET AL., 2009: 2 fest, dass insbesondere Makrofauna Arten von Bodenschadverdichtungen betroffen sind, die nicht oder nur eingeschränkt grabfähig sind. Dazu zählen beispielsweise Springschwänze, Milben und Kleinringelwürmer. Bei diesen Arten kann es in Folge einer Bodenverdichtung häufig zu einer Verringerung der Biomasse, der Siedlungsdichte und der Artenzahl kommen (WILKE ET AL., 2009: 2). Dagegen können grabfähige Arten, wie beispielsweise Regenwürmer je nach Ausmaß der Bodenverdichtung in einem gewissen Rahmen durch das Graben von Gängen und einer damit verbundenen Bodenlockerung auf eine Veränderung des Bodengefüges reagieren (LARINK ET AL., 1997: 3) Trotzdem haben Untersuchungen gezeigt, dass die Siedlungsdichte (Abundanz) von Regenwürmern durch ein schwerwiegendes Verdichtungsereignis zu Abundanzeinbrüchen von circa 50-70 % führen kann. Dies liegt vermutlich daran, dass Regenwürmer einerseits unter der hohen Radlast zerquetscht werden, andererseits aber auch daran, dass Regenwürmer verdichteten Zonen auf Grund des höheren Energieaufwandes bei der Grabtätigkeit ausweichen (LARINK ET AL., 1997: 4).

Die Auswirkungen von Bodenschadverdichtungen auf die Mikrofauna, oder auch Bodenmikroorganismen, werden in der Literatur kontrovers diskutiert. Während einige Untersuchungen von stark vermindertem Auftreten und einer reduzierten Diversität der Mikrofauna berichten (NAWAZ ET AL., 2013: 10) (LARINK ET AL., 1997: 2), konnte bei

anderen Studien entweder gar kein Effekt beobachtet oder aber in seltenen Fällen sogar ein Anstieg der mikrobiellen Biomasse festgestellt werden. LONGEPIERRE ET AL., 2021: 10 haben die Vermutung, dass solche Beobachtungen durch einen relativen Anstieg von anaerob lebenden Mikroorganismen verbunden mit einem gleichzeitigen Rückgang der aerob lebenden Mikrofauna erklärt werden können. Insgesamt kann also festgehalten werden, dass die Auswirkungen von Bodenverdichtungen auf die Mikrofauna sehr komplex und von vielen Faktoren abhängig sind, weshalb noch erheblicher Forschungsbedarf in diesem Bereich besteht. Nicht zuletzt haben Wissenschaftler häufig grundlegend unterschiedliche Versuchsergebnisse in Abhängigkeit von der verwendeten Messmethode erhalten (WILKE ET AL., 2009: 2).

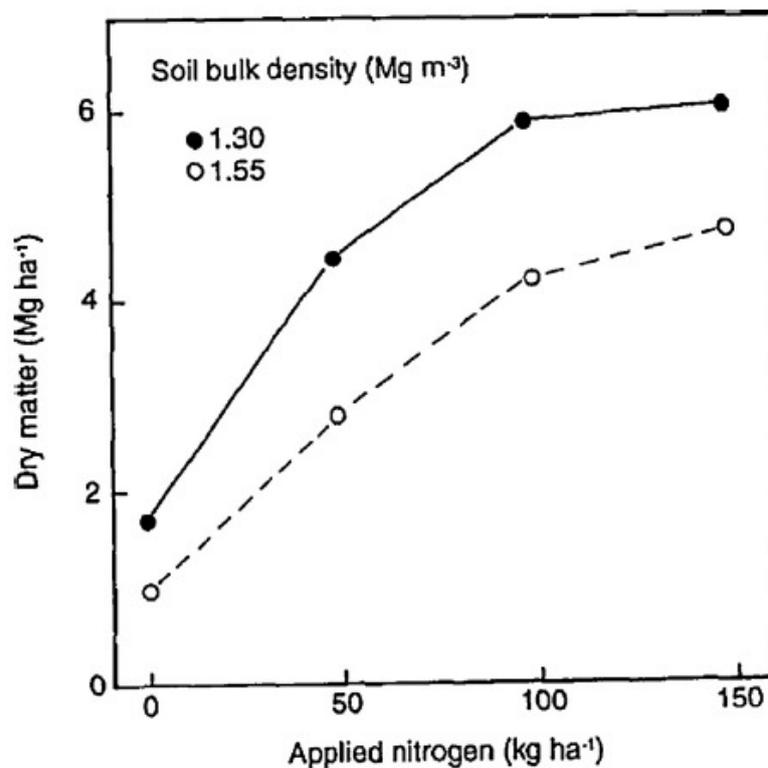
O'SULLIVAN U. SIMOTA, 1995: 6 stellen zudem fest, dass Bodenschadverdichtungen erhebliche Auswirkungen auf den Stickstoff Kreislauf haben. So wurde in einem vier-jährigen Feldversuch auf einer verdichteten ungedüngten Fläche eine Zunahme der N₂O-Emissionen von 44 % beobachtet, während auf einer anderen verdichteten Parzelle, die mit Stickstoff, Phosphor und Kalium gedüngt wurde, sogar ein Anstieg der N₂O-Emissionen von 170 % festgestellt wurde (SITLAULA ET AL., 2000: 3). Als Hauptursache für den starken Anstieg der N₂O-Emissionen auf kompaktierten Flächen wird Sauerstoffmangel im Boden und dem damit verbundenen Anstieg der Denitrifikation angeführt (CHAMEN ET AL., 2015: 6). Diese Reaktion, bei der Nitrat in elementaren Stickstoff und Stickoxide umgewandelt wird, läuft hauptsächlich unter anaeroben Bedingungen ab und nimmt mit der Nitratmenge im Boden zu. Insbesondere mit Blick auf den Klimawandel sind diese vermeidbaren Treibhausgasemissionen als äußerst kritisch einzustufen. Zumal es sich bei Lachgas (N₂O) um ein hochwirksames Treibhausgas handelt, welches eine deutlich höhere klimaerwärmende Wirkung besitzt als zum Beispiel Kohlenstoffdioxid.

Die beschriebenen pflanzenbaulichen Effekte führen letztendlich auch zu ökonomischen Auswirkungen. Hier kann es einerseits zu verminderten Einnahmen durch geringere Erträge und andererseits zu höheren Produktionskosten in Folge eines ansteigenden Betriebsmitteleinsatz wie Düngemittel und Treibstoff kommen (CHAMEN ET AL., 2015: 4). In Bezug auf die Quantifizierung möglicher Ertragseinbußen in Folge einer Bodenschadverdichtung ist eine eindeutige Aussage sehr schwierig, da hier erhebliche „Jahreseffekte“ auftreten können durch die Unberechenbarkeit der Witterung. Auch andere Faktoren, wie beispielsweise die Bodenart, die Bodenbearbeitungspraktiken und die angebaute Kultur beeinflussen das Ausmaß einer möglichen Ertragsreduzierung ganz

erheblich (CHAMEN ET AL., 2015: 3). In den wenigen publizierten Untersuchungen wurden Ertragsreduzierungen von 6-18,5 % ermittelt, wobei diese Werte mit entsprechender Unsicherheit behaftet sind und maßgeblich von den vorher beschriebenen Faktoren abhängig sind (CHAMEN ET AL., 2015: 3).

Neben den Auswirkungen auf die Erträge kann es auch zu höheren Produktionskosten auf Grund eines gesteigerten Düngemittleinsatzes kommen. So wird in Abbildung 2 der Zusammenhang zwischen der applizierten N-Menge und dem Ertrag auf einem verdichteten Boden mit einer Lagerungsdichte von 1,55 Tonnen/m³ und einem unverdichteten Boden mit einer Lagerungsdichte von 1,30 Tonnen/m³ dargestellt. Dabei kann festgestellt werden, dass für ein mittleres Ertragsniveau von 4 Tonnen Trockenmasse/ha auf dem unverdichteten Standort ungefähr 50 Kilogramm Stickstoff appliziert werden müssen, während auf dem verdichteten Standort circa 100 Kilogramm Stickstoff eingesetzt werden müssen, um das gleiche Ertragsniveau zu halten.

Abbildung 2: Die Beziehung zwischen der applizierten N-Menge und dem Ertrag bei unterschiedlichem Verdichtungsgrad des Bodens



Quelle: CHAMEN ET AL., 2015: 6

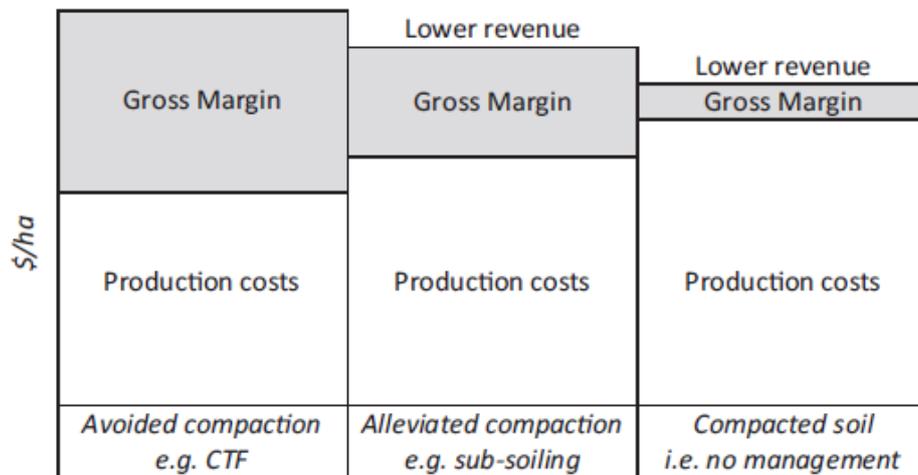
Dieser Zusammenhang wird von CHAMEN ET AL., 2015: 6 einerseits durch ein beschränktes Nährstoffaufnahmevermögen der Pflanzen in Folge einer verminderten Wurzelentwicklung erklärt und andererseits durch hohe Denitrifikationsverluste in Form von N₂O-Emissionen, insbesondere bei Staunässe und hohen Nitratgehalten im Boden. Zudem konnten Auswirkungen auf die Phosphoraufnahme festgestellt werden. So wurde auf Grund einer verminderten Wurzelentwicklung in einem verdichteten Boden mit einer Lagerungsdichte von 1,70 Tonnen/m³ die Phosphoraufnahme gegenüber einem unverdichteten Boden mit einer Lagerungsdichte von 1,40 Tonnen/m³ mehr als halbiert (CHAMEN ET AL., 2015: 4). Insbesondere in Zeiten stark ansteigender Düngemittelpreise kann die bestmögliche Vermeidung von Bodenschadverdichtungen also zum einen zu erheblichen ökonomischen Vorteilen führen und zum anderen auch den klimatischen Fußabdruck der Lebensmittelproduktion direkt positiv beeinflussen.

O'SULLIVAN U. SIMOTA, 1995: 7 stellen letztlich fest, dass auch der Energieverbrauch und die damit verbundenen Treibstoffkosten in Folge einer Bodenschadverdichtung deutlich erhöht sein können. Dieser Zusammenhang wird einerseits durch den erhöhten Bodeneindringwiderstand bei Grundbodenbearbeitungsgängen erklärt und andererseits durch zusätzlich angewandte Maßnahmen, wie eine außerordentliche Tiefenlockerung bei der vergleichsweise tief gearbeitet wird mit dem Versuch den verdichteten Zustand des Bodens zu verbessern. Zudem kommt es zu einem erhöhten Verschleiß von in den Boden eingreifenden Werkzeugen, wie zum Beispiel Scharspitzen oder Federzinken in der Radspur des Traktors. So wurde in Untersuchungen festgestellt, dass der Verschleiß in der Traktorrads spur in Abhängigkeit von Faktoren wie der Bodenfeuchte und Bodenart, 17-40 % höher war als außerhalb der Spur (CHAMEN ET AL., 2015: 5). In Bezug auf die Auswirkungen eines erhöhten Bodeneindringwiderstandes beim Vergleich eines konventionellen „Random Traffic System“ gegenüber einem „Zero Traffic System“ wurde in verschiedenen Untersuchungen ein erhöhter Zugkraftbedarf in der Größenordnung von 25-82 % im „Random Traffic System“ festgestellt. Geschätzt wird, dass die Hälfte des Energieoutputs eines Mittelklassetraktors für die Verdichtung und dem darauffolgenden Aufbrechen der verdichteten Traktorrads spur aufgewendet werden muss (CHAMEN ET AL., 2015: 4). Jedoch muss berücksichtigt werden, dass die angegebenen Werte wie die des erhöhten Zugkraftbedarfs erheblich variieren können und maßgeblich von Faktoren wie der Bodenfeuchte und der Bodenart abhängig sind.

Nachdem der Prozess der Bodenschadverdichtung und dessen Auswirkungen ausführlich dargestellt wurden, stellt sich die Frage nach Maßnahmen zur Regeneration von entstandenen Gefügeschäden. Im Falle von Unterbodenverdichtungen durch hohe Radlasten und ungünstige Witterungsbedingungen muss klargestellt werden, dass diese extrem persistent sind und auch erhebliche Anstrengungen, wie beispielsweise eine mechanische Unterbodenlockerung nur geringe Erfolgchancen versprechen. Somit kommt es insbesondere im Unterboden zu langfristigen Gefügeschädigungen, die ein geringes Regenerationspotential aufweisen (LARINK ET AL., 1997: 2) (COLOMBI U. KELLER, 2019: 1) (LONGEPIERRE ET AL., 2021: 1). Bei Oberbodenverdichtungen wird in der landwirtschaftlichen Praxis häufig eine mechanische Maßnahme in Form einer Tiefenlockerung durchgeführt. Studien haben allerdings ergeben, dass es in Folge einer Tiefenlockerung des Bodens bei nachfolgendem Feldverkehr auf Grund der stark verminderten Bodenfestigkeit zu noch schwerwiegenderen Bodenverdichtungen kommen kann (SCHJØNNING ET AL., 2019: 17) (HAMZA U. ANDERSON, 2005: 15). Um das Risiko einer erneuten Verdichtung zu vermindern, wird die zeitgleiche Applikation von Gips oder kohlenstoffbasierten Präparaten, wie beispielsweise Kompostextrakten direkt hinter dem Zinken empfohlen. Diese Applikation soll die Strukturbildung des Bodens fördern (HAMZA U. ANDERSON, 2015: 15). Pflanzenbauliche Maßnahmen wie der Aufbau der organischen Kohlenstoffgehalte im Boden und der Nutzung von Zwischenfrüchten zur Regeneration von Gefügeschäden werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit Beachtung geschenkt.

In Anbetracht der Tatsache, dass bereits geschätzte 68 Millionen Hektar Ackerland weltweit von Bodenschadverdichtungen betroffen sind – mit steigender Tendenz – und die vollständige Regeneration von verdichteten Böden eine große Herausforderung darstellt, ist die im Hinblick auf Ökonomie und Ökologie am erfolgsversprechendste Herangehensweise Bodenverdichtungen erst gar nicht entstehen zu lassen.

Abbildung 3: Der Effekt unterschiedlicher Managementstrategien von Bodenverdichtungen auf den Unternehmensgewinn



Quelle: CHAMEN ET AL., 2015: 2

Dabei spielen alternative Bewirtschaftungsverfahren, wie beispielsweise „Controlled Traffic Farming“ bei dem immer dieselben Fahrspuren genutzt werden, eine entscheidende Rolle. In Abbildung 3 ist der ökonomische Effekt eines solchen Verfahrens, bei dem Bodenschadverdichtungen im Vergleich zu konventionellen Verfahren erfolgreich vermieden werden, abgebildet. Der Unternehmensgewinn wird im Controlled Traffic System zum einen durch höhere Erträge und zum anderen durch geringere Produktionskosten positiv beeinflusst. Deshalb wird Controlled Traffic Farming im weiteren Verlauf dieser Arbeit detailliert behandelt.

3.3 Auswirkungen von chemischen Dünge- und Pflanzenschutzmitteln auf das Bodenleben

Auswirkungen des Mineraldüngereinsatzes auf Bodenmikroorganismen

Im Zuge der „Grünen Revolution“ hat der Einsatz von Mineraldüngern erheblich zugenommen. Insbesondere bei Stickstoff als einer der Hauptnährstoffe im Pflanzenbau, konnte ein globaler Produktionsanstieg von 11.600.000 Tonnen im Jahr 1961 auf 104.000.000 Tonnen im Jahr 2006 festgestellt werden (MULVANEY ET AL., 2009: 1). Diese enorme Zunahme in der mineralischen Stickstoffdüngerproduktion wurde maßgeblich durch die Entwicklung des Haber-Bosch-Verfahrens, wobei in einem äußerst energieintensiven Prozess elementarer Stickstoff (N_2) in hochreaktives Ammoniak (NH_3) umgewandelt wird. Daraus werden anschließend unterschiedliche Mineraldünger als Endprodukte gewonnen (MULVANEY ET AL., 2009: 1).

Neben umfassend behandelten Auswirkungen von mineralischen Stickstoffdüngern auf den Zustand und die Qualität von natürlichen Ökosystemen durch beispielsweise Auswaschung von Nitrat, Zunahme von Emissionen und Eutrophierung von Gewässern, führen Unterstützer der „Regenerativen Landwirtschaft“ an, dass mineralische Düngemittel auch erhebliche Auswirkungen auf Bodenmikroorganismen haben und somit natürlich ablaufende Prozesse der Nährstoffversorgung immer wieder unterbrochen werden, was sich letztendlich in einer stark reduzierten Bodengesundheit widerspiegelt (MASTERS, 2019) (JONES, 2019).

In den letzten Jahren sind einige Artikel erschienen, die die zentralen Aussagen zu diesem Thema aus wissenschaftlicher Sicht zusammenfassen. So wird insgesamt zunächst zwischen direkten und indirekten Effekten von Mineraldüngerapplikation auf Bodenmikroorganismen unterschieden. Ein wichtiger direkter Effekt entsteht durch den enormen lokalen Konzentrationsanstieg von ammoniakalischem Stickstoff in Form von Ammoniak (NH_3) oder Ammonium (NH_4^+) nach einer Düngerapplikation. So kann die Konzentration rund um ein Harnstoffkorn auf über 3000 mg/g Boden ansteigen (GEISSELER U. SCOW, 2014: 6). Solch hohe ammoniakalischen Konzentrationen können in der Folge zum Absterben von Bodenmikroorganismen führen.

Indirekte Effekte des Mineraldüngereinsatzes auf Bodenmikroorganismen können einerseits auf eine Veränderung der C_{org} -Gehalte und andererseits durch Auswirkungen auf den pH-Wert des Bodens zurückgeführt werden. Mehrere Untersuchungen kommen zu dem Ergebnis, dass Mineraldünger in Folge von Ertragssteigerungen auch einen positiven Effekt auf die Biomasse von Nichtkornbestandteilen hat, die dem Boden in Form von Ernterückständen wieder zugeführt werden. Dadurch werden langfristig die C_{org} -Gehalte des Bodens gesteigert (REN ET AL., 2020: 2) (ALVAREZ, 2005: 1). So wurde in einer umfassenden Analyse von Langzeitversuchen festgestellt, dass der C_{org} -Gehalt auf N-gedüngten Parzellen zwischen 8-10 % höher war als auf ungedüngten Parzellen (GEISSELER U. SCOW, 2014: 5). Da ein enger Zusammenhang zwischen dem C_{org} -Gehalt und der mikrobiellen Biomasse besteht, kann deshalb davon ausgegangen werden, dass ein Anstieg der mikrobiellen Biomasse unter mineralisch gedüngten Parzellen hauptsächlich durch eine Steigerung der C_{org} -Gehalte erklärt werden kann (GAUTAM ET AL., 2020: 7) (GEISSELER U. SCOW, 2014: S.5).

Ein weiterer indirekter Effekt entsteht durch die Veränderung des Boden pH-Wertes durch Oxidation von Ammonium zu Nitrit und anschließen zu Nitrat, dem sogenannten Prozess der Nitrifikation bei dem Protonen frei werden. Die potenziellen negativen Auswirkungen dieses Effektes auf Bodenmikroorganismen hängen maßgeblich von Maßnahmen ab, die eine Absenkung der pH-Werte verhindern oder entgegensteuern. So kann beispielsweise durch die Wahl des Düngemittels eine Bodenversauerung erfolgreich vermieden werden und durch die Applikation von Kalk können niedrige pH-Werte angehoben werden. So wurde in einem 20 Jahre andauernden Versuch bei einer Düngung mit Ammonium-Sulfat eine Abnahme des pH-Wertes um 1,5 Einheiten festgestellt, während bei Verwendung von Calcium-Nitrat keinerlei Auswirkungen auf den pH-Wert des Bodens beobachtet werden konnten (GEISSELER U. SCOW, 2014: 5). In verschiedenen Studien konnte festgestellt werden, dass der pH-Wert des Bodens maßgeblich die Zusammensetzung der Bodenmikroorganismen beeinflusst (REN ET AL., 2020: 10) (GEISSELER U. SCOW, 2014: 6). So nimmt die Diversität der mikrobiellen Biomasse bei pH-Werten kleiner 5 stark ab und ist bei neutralen pH-Werten im Bereich 7-8 am höchsten (GEISSELER U. SCOW, 2014: 6).

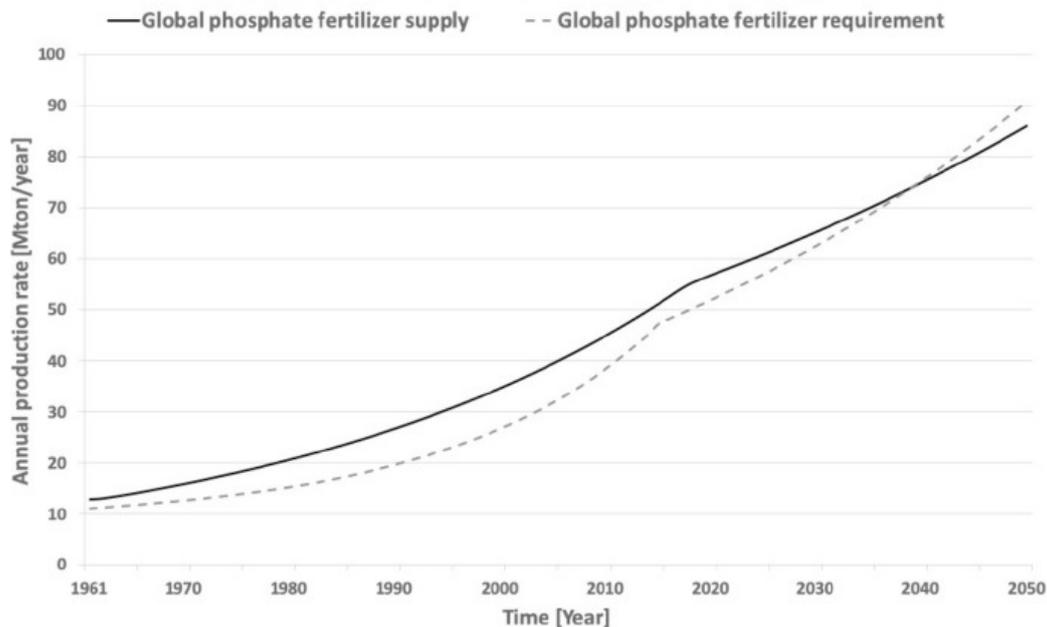
Insgesamt ist anzunehmen, dass sich die indirekten Effekte stärker auf das mikrobielle Bodenleben auswirken als die direkten Effekte, da für Bodenlebewesen toxische ammoniakalische Konzentrationen einerseits räumlich begrenzt sind und andererseits auch

innerhalb weniger Tage oder Wochen durch Nitrifikation oder die Aufnahme durch die Pflanze abgebaut werden (GEISSELER U. SCOW, 2014: 6). Die Antwort auf die Frage, ob mineralischer N-Dünger das mikrobielle Bodenleben negativ beeinflusst ist nicht eindeutig zu beantworten, da mehrere Untersuchungen zu unterschiedlichen Ergebnissen gekommen sind. So stellen GEISSELER U. SCOW, 2014: 5 in ihrer Auswertung von 64 Langzeitversuchen fest, dass die mikrobielle Biomasse auf gedüngten Parzellen über alle Datensätze um 15,1 % erhöht war gegenüber einer ungedüngten Kontrollvariante. GAUTAM ET AL., 2020: 3 ff. konnten in der Analyse ihres 16-jährigen Dauerversuches hingegen jedoch keinen Effekt einer mineralischen N-Düngung auf das Bodenleben beobachten. Diese zum Teil fundamental unterschiedlichen Versuchsergebnisse können auf die Komplexität der Zusammenhänge zurückgeführt werden und den damit verbundenen variierenden Versuchsparemtern wie beispielsweise Klima, Versuchsdauer, Kultur, Fruchtfolge und Bodentyp (GEISSELER U. SCOW, 2014: 3). Zudem ist neben dem Effekt auf die reine Masse an Bodenmikroorganismen auch der Effekt auf deren Zusammensetzung entscheidend, also die Diversität der mikrobiellen Biomasse. Hierzu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden.

Festzuhalten bleibt, dass die Frage, wie sich mineralische N-Dünger auf das Bodenleben auswirken aus wissenschaftlicher Sicht nicht eindeutig beantwortet werden kann. Dennoch gibt es mit der Analyse der direkten und indirekten Effekte Ansätze, um eine mögliche Folgenabschätzung für das Bodenleben vorzunehmen.

Neben Stickstoff ist Phosphor einer der Hauptpflanzennährstoffe, der anders als Stickstoff jedoch hauptsächlich auf dem Abbau endlicher Ressourcen in Form von Gesteinen basiert. Zwar gibt es Ansätze Phosphor aus organischen Restprodukten wie beispielsweise Klärschlamm etc. zu recyceln doch der Großteil des applizierten Phosphors stammt nach wie vor aus den globalen Phosphorminen. Dabei zieht die Produktion von Phosphor Düngemitteln einige Umweltprobleme nach sich. So entsteht bei der Produktion von Phosphorsäure, welche die Ausgangsbasis für alle Phosphor Düngemittel ist, als Nebenprodukt Calciumsulfat Hydrat. Ungefähr 5,5 Tonnen davon fallen pro Tonne Phosphorsäure an, welches als toxisch eingestuft wird und große Mengen Schwermetalle und radioaktive Elemente wie Uranium enthält (NEDELICIU ET AL., 2020: 6).

Abbildung 4: Globale Angebot und Nachfrage Beziehung von Phosphordüngemitteln in einem „business-as-usual“ Szenario



Quelle: NEDELICIU ET AL., 2020: 6

Darüber hinaus steigt die Nachfrage nach phosphorhaltigen Düngemitteln, insbesondere in Schwellen- und Entwicklungsländern stetig an. Die Verfügbarkeit und damit einhergehend auch die Produktionsrate dieser natürlichen Ressource ist jedoch begrenzt. So kann aus Abbildung 4 abgeleitet werden, dass die Nachfrage das Angebot von phosphorhaltigen Düngemitteln in einem business-as-usual Szenario bereits im Jahr 2040 überschreiten würde. Diese Annahme impliziert, dass wenig Anstrengungen in Bezug auf das Phosphor Recycling unternommen werden und größtenteils gewirtschaftet wird wie bisher (NEDELICIU ET AL., 2020: 6).

Einerseits stehen wir also vor der Herausforderung die steigende Nachfrage nach Phosphordüngemitteln vor dem Hintergrund der globalen Ernährungssicherheit sicherzustellen, und das bei knappen Ressourcen und zum Teil erheblichen Umweltbelastungen der Produktion. Andererseits stellt Masters fest, dass insbesondere Böden, die in der Vergangenheit regelmäßig mit Phosphor versorgt wurden in der Regel hohe Phosphorgehalte aufweisen, die allerdings durch die Bindung an Aluminium, Calcium und Eisenionen fixiert und damit nicht pflanzenverfügbar sind (MASTERS, 2019: 165).

Dieses Phänomen der Überversorgung von Böden bei gleichzeitig knapper werdenden globalen Phosphor-Ressourcen bezeichnet man als Phosphor Paradoxon (LEINWEBER ET AL., 2018: 1). Zur Bewältigung dieser Herausforderung können Bodenmikroorganismen einen entscheidenden Beitrag leisten, der im folgenden Kapitel behandelt wird.

Auswirkungen chemischer Pflanzenschutzmittel auf das Bodenleben

Neben der Zunahme des Mineraldüngereinsatzes konnte weltweit betrachtet auch ein enormer Anstieg des Pflanzenschutzmitteleinsatzes von ca. 1,5 Mio. Tonnen im Jahr 1990 auf ungefähr 4 Mio. Tonnen im Jahr 2022 beobachtet werden (ZHANG, 2018: 5). Dieser Trend ist unter anderem auf Entwicklungen wie die großflächige Einführung von genmodifizierten glyphosat-toleranten Sorten zurückzuführen, die mutmaßlich mit einer beschleunigten Resistenzentwicklung bei Unkräutern einhergeht (SILVIA ET AL., 2020: 2 ff.). Weltweit gibt es circa 700 Pestizide, denen ein Effekt auf ungefähr 95 Zielorgansimen/-pflanzen nachgewiesen wurde. Darunter Schadinsekten, Unkräuter und pilzliche Erreger (KALIA U. GOSAL, 2011: 4). Während sich Insektizide hauptsächlich auf das Nervensystem von Insekten auswirken, zielen Herbizide auf die Blockade von pflanzenspezifischen Syntheseprozessen, wie beispielsweise die Synthese von Karotinoiden oder freien Aminosäuren ab. Fungizide hingegen blockieren grundlegende Zellfunktionen durch einen Synthesestopp von [essenziellen Lipiden und Enzymen](#) (KALIA U. GOSAL, 2011: 4).

Neben den bekannten negativen Umweltauswirkungen des chemischen Pflanzenschutzes, wie die Kontamination von Gewässern oder die Anreicherung von Rückständen in Böden und Lebensmitteln, postulieren Anhänger der „Regenerativen Landwirtschaft“ immer wieder, dass eine starke Reduzierung oder sogar Vermeidung jeglicher Pestizide auf chemischer Basis unabdingbar ist, um die negativen Auswirkungen auf das Bodenleben zu begrenzen und somit die Bodengesundheit langfristig zu erhöhen. Dieser Zusammenhang soll im Folgenden aus wissenschaftlicher Perspektive untersucht werden.

Ebenso wie bei den Mineraldüngerauswirkungen, können direkte und indirekte Effekte von Pestiziden auf das Bodenleben unterschieden werden. Während direkte Effekte die Funktion und das Überleben von Mikroorganismen beeinflussen, wirken sich indirekte Effekte durch eine Veränderung der Umgebung oder der Wirtspflanze auf die mikrobielle Biomasse aus (RUUSKANEN ET AL., 2023: 2). Das Totalherbizid Glyphosat kann sich beispielsweise durch die Hemmung des Enzyms 5-enolpyruvylshikimate-3-phosphate synthase (EPSPS) und

einer damit einhergehenden ausbleibenden Synthese von essenziellen Aminosäuren direkt auf die Bodenmikroorganismen auswirken. Weitere Enzyme, die gehemmt werden können, sind acetolactate synthase (ALS) und acetyl-CoA carboxylase (ACC) (RUUSKANEN ET AL., 2023: 2). Darauf folgend kann es zu erheblichen Auswirkungen auf die Synthese von Phytohormonen und sogenannten [VOCs \(volatile organic compounds\)](#) kommen, denen eine Schlüsselrolle bei der Abwehr von Schadinsekten und Infektionen sowie dem Anziehen von bestäubenden Insekten zukommt (RUUSKANEN ET AL., 2023: 5). Indirekte Effekte von Pestiziden entstehen hauptsächlich durch eine Veränderung der Pflanzengesellschaft oder Pflanzeigenschaften, da sich pflanzenspezifische Mikroorganismen im Wurzelraum ansiedeln.

Zudem kann es in der Folge einer Pestizidapplikation zu einer veränderten Zusammensetzung der mikrobiellen Biomasse kommen. Insbesondere dadurch, dass Mikroorganismen unterschiedlich empfindlich gegenüber Pestizidbelastungen sind und dass einige Mikroorganismen Pflanzenschutzmittel als Nährstoffquelle nutzen. Beispiele dafür sind Atrazine und Glyphosat, die von Pseudomonas und Arthrobacter Bakterien metabolisiert werden. Dadurch kann es zu einem relativen Anstieg der pestizid-metabolisierenden Mikroorganismen in der mikrobiellen Biomasse kommen (RUUSKANEN ET AL., 2023: 2).

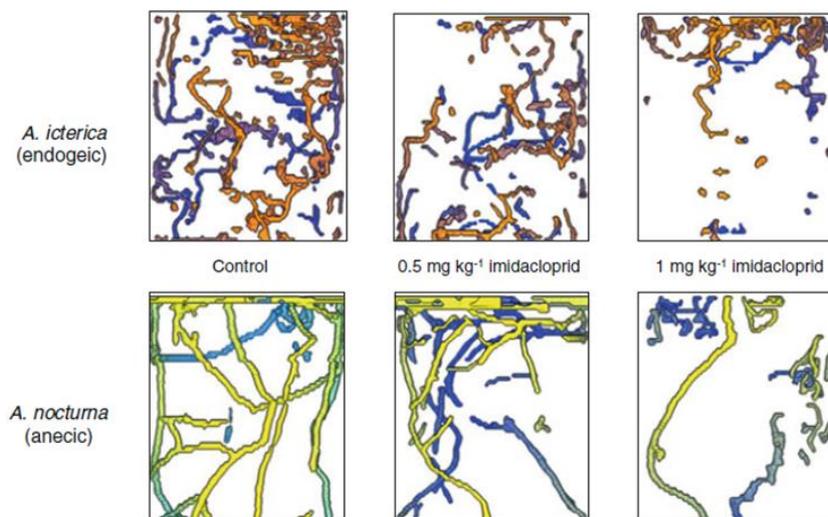
Eine der wenigen eindeutigen Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln auf die Mikrobiologie des Bodens ist der Effekt von Fungiziden auf Mykorrhiza-Pilze. So stellen (KALIA U. GOSAL, 2011: 10) fest, dass insgesamt die Anzahl und die Diversität von Bodenpilzen verringert wird und in Bezug auf Mykorrhiza-Pilze einerseits die Hyphenlänge und andererseits die Sporenkeimung reduziert wird. Diese Feststellung ist insbesondere im Hinblick auf die zahlreichen Funktionen von Mykorrhiza-Pilzen (Nährstofferschließung bis Verbesserung der Bodenstruktur) interessant, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit intensiver diskutiert werden. Ansonsten gibt es auch in Bezug auf die Frage wie sich Pestizide auf Bodenmikroorganismen auswirken sehr unterschiedliche Ergebnisse. Diese werden von IMFELD U. VUILLEUMIER, 2012: 6 und RUUSKANEN ET AL., 2023: 2 durch die Variabilität der Einflussfaktoren, wie Toxizität der applizierten PSM, Empfindlichkeit der Mikroorganismen, Klima und der insgesamt großen Komplexität der Zusammenhänge erklärt. So kann es beispielsweise nach einer Pestizidapplikation zur Abnahme von empfindlichen Mikroorganismen kommen, während sich Mikroorganismen, die das Pestizid

als Nährstoffquelle nutzen, stark vermehren (RUUSKANEN ET AL., 2023: 2). Folglich ist es äußerst schwierig einen Biomasseeffekt auszumachen.

Neben Mikroorganismen spielen auch Regenwürmer als Vertreter der Makrofauna eine bedeutende Rolle im Hinblick auf wichtige Bodenfunktionen. So beeinflussen diese unter anderem C_{org} -Dynamiken, die Bodenstruktur und die Wasser- und Luftinfiltration. PSM können sich einerseits auf die Biomasse, das Wachstum und den Reproduktionserfolg auswirken und andererseits auf das Regenwurmverhalten (PELOSI ET AL., 2014: 8, 15 ff.). Insgesamt scheinen Insektizide und Fungizide mit den Wirkstoffgruppen Nicotinoide, Strobilurine, Sulfonylharnstoffe, Triazole, Carbamate und Organophosphate zu den PSM mit der höchsten Regenwurmtoxizität zu gehören. Jedoch können in Bezug auf die Biomasse, Wachstum und Reproduktionserfolg entweder keine oder nur minimale Effekte beobachtet werden, solange die Pestizidapplikation in üblichen agronomischen Mengen erfolgt (PELOSI ET AL., 2014: 8). Trotzdem wurde bei einer Untersuchung in der kein oder stark reduziert PSM eingesetzt wurde ein positiver Effekt auf die Regenwurmbiomasse (g/m^2) festgestellt, was insbesondere durch die Zunahme von große Regenwurmartens erklärt wurde, die wiederum eine wichtige Rolle bei der Verbesserung der Bodenstruktur sowie Erhöhung der Porosität und Bodenfruchtbarkeit spielen (PELOSI ET AL., 2014: 19). Es gibt also auch keine eindeutigen Ergebnisse in Bezug auf die Frage, wie sich PSM auf die Biomasse, das Wachstum und den Reproduktionserfolg auswirken.

In mehreren Studien konnten hingegen Auswirkungen von PSM Applikation auf das Regenwurmverhalten nachgewiesen werden. So kann es beispielsweise zu einem Vermeidungsverhalten von mit PSM kontaminierten Bodenregionen kommen, da Regenwürmer in der Lage sind für sie toxische Substanzen zu identifizieren. Außerdem wird das Grabeverhalten, welches den Großteil der positiven Effekte von Regenwürmern begründet, stark beeinflusst.

Abbildung 5: Der Effekt von unterschiedlichen Konzentrationen des Insektizids Imidacloprid auf das Grabeverhalten von zwei Regenwurmarten



Quelle: PELOSI ET AL., 2014: 17

So kann anhand von Abbildung 5 festgestellt werden, dass es durch eine Insektizidapplikation zu erheblichen Auswirkungen auf das komplette Tunnelsystem kommt. Dabei werden die Länge, Tiefe und Verzweigungsrate der Tunnel negativ beeinflusst (PELOSI ET AL., 2014: 17). Diese Effekte nehmen mit einer ansteigenden Insektizidkonzentration im Boden zu und gehen wahrscheinlich mit einer Abnahme wichtiger bodenphysikalischer Parameter, wie der Wasserinfiltrationskapazität einher. Darüber hinaus kann eine eingeschränkte Aktivität der Regenwürmer in Folge einer PSM Applikation zu einer Abnahme von Regenwurmausscheidungen führen, die unter anderem für die Struktur des Bodens von großer Bedeutung sind (PELOSI ET AL., 2014: 17).

Insgesamt sind die Untersuchungsergebnisse in Bezug auf die Frage, ob und wie sich chemische Inputs wie mineralische Düngemittel und Pflanzenschutzmittel auf das Bodenleben auswirken sehr heterogen und definitiv nicht so klar und eindeutig, wie dies von Unterstützern der Regenerativen Landwirtschaft behauptet wird. Dies liegt maßgeblich an der Komplexität der Zusammenhänge, variierenden Versuchsparemtern und zahlreichen wenig erforschten Interaktionen zwischen Mikroorganismen und ihrem Habitat Boden und Pflanze. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit der Weiterentwicklung der technischen Untersuchungsmethoden auch neue Erkenntnisse auf molekularer Ebene gewonnen werden können (PELOSI ET AL., 2014: 7).

4 Die Effekte eines gesunden Bodens

In Anbetracht der stetig steigenden Weltbevölkerung und der daraus resultierenden notwendigen Steigerung der Nahrungsmittelproduktion, bei gleichzeitig erforderlichen verminderten Umweltauswirkungen der Landbewirtschaftung, kommt dem Konzept der Bodengesundheit eine besondere Bedeutung zu. Dabei wird der Boden nicht nur als inaktives „Medium“ oder „Substrat“ zur Maximierung der Nahrungsmittelerzeugung betrachtet, sondern als ein lebender, dynamischer Organismus, der ein ganzheitliches Management verlangt und verschiedene Ökosystemfunktionen mit der Nahrungsmittelproduktion vereint und somit eine nachhaltige Ernährung der Menschheit gewährleistet (FRAC ET AL., 2018: 2). In der wissenschaftlichen Literatur wird der Begriff Bodengesundheit als „die Fähigkeit des Bodens, innerhalb eines Ökosystems und der Grenzen der Landnutzung zu funktionieren, die biologische Produktivität zu erhalten, die Umweltqualität zu erhalten, die Gesundheit von Pflanzen und Tieren zu fördern und die menschliche Gesundheit und Lebensweise zu unterstützen“ definiert (PRASHAR U. SHAH, 2016: 5).

Abbildung 6: Parameter der Bodengesundheit



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an PRASHAR U. SHAH, 2016: 6

Für eine umfassende Bewertung der Bodengesundheit müssen Chemische, Physikalische und Biologische Parameter des Bodens herangezogen werden, wie in Abbildung 6 dargestellt ist. Dabei beeinflussen sich die Parameter zwar wechselseitig, jedoch kann daraus eindeutig abgeleitet werden, dass ein intaktes Bodenleben eine zentrale Komponente eines gesunden Bodens und damit einer nachhaltigen Landwirtschaft ist (SHAH ET AL., 2021: 1).

4.1 Das Bodenleben als zentraler Indikator für die Bodengesundheit

In einem Gramm gesunden Boden befinden sich ungefähr 1-100 Millionen Bakterien, 0,15-0,5 mg pilzlicher Hyphen, 10-100 Tausend Protozoen, wenige bis mehrere Hundert Mikroarthropoden (Milben, Spinnen etc.), 15-500 Nematoden und einige Regenwürmer (KALIA U. GOSAL, 2011: 3). Welchen Beitrag die wichtigsten Gruppen dieser Bodenlebewesen in Bezug auf die Produktivität und Nachhaltigkeit von Agrarökosystemen leisten, soll im folgenden Abschnitt dargestellt werden.

Bakterien

Eine der wichtigsten Gruppe von Bodenmikroorganismen ist die der Bakterien, wobei den sogenannten „Plant Growth-Promoting Rhizobacteria“ (PGPR) eine besondere Bedeutung zukommt. Der Name PGPR leitet sich aus der nachgewiesenen wachstumsfördernden Wirkung dieser in der Rhizosphäre lebenden Einzeller ab. Als Rhizosphäre wird der Bereich des Bodens verstanden, der sich in unmittelbarer Nähe zur Pflanzenwurzel befindet und durch die Pflanze mittels Wurzelexsudaten (z.B. Kohlenhydraten, Aminosäuren, Flavonoiden, aliphatische Säuren und Fettsäuren) signifikant in seiner physikalischen, chemischen und biologischen Zusammensetzung verändert wird und eine besonders hohe mikrobielle Aktivität aufweist (SHAH ET AL., 2021: 3). Zudem wurde festgestellt, dass sich die Zusammensetzung und Konzentration der Wurzelexsudate in Abhängigkeit von biotischen und abiotischen Faktoren sowie aufgenommen Signalen aus der Umwelt und Rhizosphäre verändern und somit auch die mikrobielle Zusammensetzung beeinflusst wird (CHAPARRO ET AL., 2012: 2). PGPR siedeln sich innerhalb der Rhizosphäre entweder unmittelbar um die Wurzeln (rhizosphärisch), direkt auf der Wurzeloberfläche (rhizoplan)

oder innerhalb des Wurzelgewebes (endophytisch) an (SINGH ET AL., 2011: 3) (RAHMAN ET AL., 2021: 4). Folgende Bakterienstämme werden den PGPR zugeordnet: Proteobakterien, Acidobakterien, Actinobakterien, Firmicutes, Bacteroidetes, Azospirillum, Azotobacter, Burkholderia, Enterobacter, Pseudomonas, Rhizobium, Flavobacterium und Erwinia, wobei Proteobakterien auf Grund ihrer Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichste Bedingungen zu den am häufigsten vertretenen PGPR gehören, gefolgt von Acidobakterien die insbesondere am C-Kreislauf durch die Zersetzung schwer abbaubarer organischer Substanzen wie Cellulose und Lignin beteiligt sind (ISLAM ET AL., 2020: 4) (RAHMAN ET AL., 2021: 3 ff.) (SINGH ET AL., 2011: 4).

Ein bedeutender Mechanismus wie PGPR das Wachstum von Pflanzen beeinflussen können umfasst die Produktion von Phytohormonen. Dabei handelt es sich um organische Substanzen, die das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen bereits in geringsten Konzentrationen beeinflussen. Insgesamt werden fünf verschiedene Gruppen von Phytohormonen unterschieden: Auxine, Gibberelline, Cytokinine, Ethylen und Abscisinsäure (HAYAT ET AL., 2010: 7 ff.). Der Effekt der unterschiedlichen Phytohormone auf das Pflanzenwachstum variiert sehr stark. So wurde festgestellt, dass die Substanz Indol-3-Essigsäure, die zu der Gruppe der Auxine gehört, einen kurzfristigen Effekt durch die Förderung der Zellstreckung und einen langfristigen Effekt durch die Stimulierung der Zellteilung und -differenzierung hervorruft. Es wird geschätzt, dass 80 % der PGPR in der Lage sind diese bedeutende Substanz zu synthetisieren (HAYAT ET AL., 2010: 9). Dem gegenüber steht das Phytohormon Ethylen, welches sich insbesondere bei höheren Konzentrationen nach der Keimung negativ auf die Wurzelentwicklung auswirken kann (SINGH ET AL., 2011: 5) (HAYAT ET AL., 2010: 9 ff.). Viele der PGPR, wie beispielsweise Bakterienstämme der Familie Azospirillum, Burkholderia, Enterobacter, Pseudomonas oder Rhizobium sind in der Lage das Ethylenlevel der Pflanzen zu senken: Durch die Synthese des Enzyms 1-Aminocyclopropane-1-Carboxylat Deaminase wird Aminocyclopropane-1-Carboxylat, welches ein Ausgangsprodukt der Ethylensynthese ist, hydrolysiert. Die Produkte der Hydrolyse, Ammoniak und α -Ketobutyrat, werden dabei von den PGPR als Stickstoff und Kohlenstoffquelle genutzt (SINGH ET AL., 2011: 5) (HAYAT ET AL., 2010: 9 ff.). Auf diese Weise können PGPR das Ethylenlevel von Pflanzen signifikant senken und dadurch die Wurzelentwicklung verbessern sowie die Stresstoleranz von Pflanzen, in Folge von zum Beispiel Dürren, erhöhen.

Eine weitere zentrale Interaktion mit pflanzenbaulicher Bedeutung zwischen Bodenmikroorganismen und Pflanzen besteht in der symbiontischen Beziehung von Pflanzen der Familie der Fabaceae (Hülsenfrüchtler) und dem PGPR Bakterienstamm Rhizobien (Knöllchenbakterien). Dabei scheiden Pflanzenwurzeln der Familie Fabaceae verschiedene Flavonoide und Isoflavonoide aus, die als Botenstoffe das Gen zur Knöllchenbildung bei den Knöllchenbakterien aktivieren. Nachdem die Rhizobien über die Wurzelhaare in die Pflanze eindringen, vermehren sie sich stark und gelangen anschließend in das Cytoplasma, also das Innere der Zellen. In den Wurzelzellen kommt es dann durch die Vergrößerung von Bakterienzellen zu der Bildung der sogenannten „Knöllchen“. Dort werden die Rhizobium Bakterien von der Pflanze über Wurzelabscheidungen mit Kohlenhydraten versorgt, während diese im Gegenzug N_2 aus der Atmosphäre in pflanzenverfügbares NH_4^+ (Ammonium) umwandeln. Durch diese symbiontische Beziehung können Ackerbohnen durchschnittlich 200 kg Stickstoff und Erbsen 150 kg Stickstoff pro ha und Jahr fixieren und somit einen entscheidenden Beitrag leisten, den Einsatz externer Betriebsmittel wie Mineraldünger zu reduzieren (MARQUARD, 2000).

Wie bereits dargestellt ist Phosphor ein bedeutender Makronährstoff, der in Böden in organischer und anorganischer Form vorkommt und auf dem Abbau natürlicher Ressourcen basiert, deren Vorkommen limitiert ist. Ein Großteil des im Boden befindlichen Phosphors ist fixiert und kann somit nicht von der Pflanze aufgenommen werden, obwohl ausreichende Phosphor Mengen vorhanden wären. So liegt die P-Konzentration in der Bodenlösung häufig bei 1 ppm oder sogar darunter (HAYAT ET AL., 2010: 6). Hier können PGPR einen bedeutenden Beitrag leisten, fixierte Phosphorformen in HPO_4^{2-} und $H_2PO_4^-$ umzuwandeln und damit pflanzenverfügbar zu machen (MORGAN ET AL., 2005: 2) (HAYAT ET AL., 2010: 6). Insbesondere PGPR der Stämme *Pseudomonas*, *Rhizobium* und *Bacillus* gehören zu den bedeutendsten Phosphatlösern, die sogar in der Lage sind, mineralische Phosphate wie Tricalcium-Phosphat, Dicalcium-Phosphat, Hydroxyl-Apatit und Rohphosphate zu lösen (RAHMAN ET AL., 2021: 3) (KHAN ET AL., 2010: 4) (HAYAT ET AL., 2010: 4). Die Lösung mineralischer Phosphate durch die PGPR erfolgt dabei in erster Linie durch die Freisetzung organischer Säuren, wie beispielsweise Gluconsäure. Phosphor in organischer Form muss hydrolysiert werden, um es pflanzenverfügbar zu machen. Hier leisten PGPR einen bedeutenden Beitrag durch die Synthese und Freisetzung von P-lösenden Enzymen, wie [Phosphatase](#), Phytase und Phosphonoacetat-hydrolase (HAYAT ET AL., 2010: 6 ff.).

Bodenpilze

Neben Bakterien gehören Pilze zu den wichtigsten Vertretern der Bodenmikroorganismen. Bezogen auf einen Gramm Boden ist die Biomasse von Bodenpilzen gegenüber anderen Gruppen von Mikroorganismen am größten. Bodenpilze zeichnen sich durch eine besondere Plastizität aus, wodurch sie sich mittels unterschiedlicher Lebensformen sehr gut an ungünstige Umweltbedingungen anpassen können (ISLAM ET AL., 2020: 5) (SHAH ET AL., 2021: 3) (RAHMAN ET AL., 2021: 5) (FRAC ET AL., 2018: 1). Viele Pilzarten sind zudem in der Lage Schwermetalle, wie beispielsweise Cadmium, Kupfer, Quecksilber oder Blei zu absorbieren und abzubauen und damit die Schwermetallbelastung des Bodens erheblich zu reduzieren. ISLAM ET AL., 2020: 5 und SHAH ET AL., 2021: 3 stellen fest, dass Diversität und Aktivität der Bodenpilze maßgeblich von biotischen (z.B. Pflanzenzusammensetzung) und abiotischen Faktoren (z.B. Boden pH, Bodenfeuchte, Salzgehalt, Struktur und Temperatur) abhängt.

Neben der symbiontischen Beziehung zwischen PGPR und Pflanzen zur atmosphärischen Stickstofffixierung, zählt die Symbiose zwischen Mykorrhiza-Pilzen und Pflanzen zu den bedeutendsten Mikroorganismen-Pflanzen Interaktionen (MORGAN ET AL., 2005: 4). Über 80 % der Pflanzen sind in der Lage eine Verbindung mit Mykorrhiza-Pilzen aufzubauen (MASTERS, 2019: 56) Dabei versorgt die Pflanze den Mykorrhiza-Pilz mit kohlenstoffhaltigen Verbindungen aus der Photosynthese, während der Pilz die Pflanze im Gegenzug mit mineralischen Nährstoffen versorgt. Es wird geschätzt, dass 4-20 % der Photosyntheseprodukte der symbiontischen Beziehung zugutekommen, während sich der Mykorrhiza-Pilz zum Hauptorgan der Nährstoffaneignung entwickeln kann (MORGAN ET AL., 2005: 4). Trotzdem sind ungefähr 10 % der Pflanzenfamilien nicht-mykorrhizal und gehen keine symbiontische Beziehung mit Mykorrhiza-Pilzen ein. Dazu gehören unter anderem Familien der Gattung Brassicaceae, Caryophyllaceae, Chenopodiaceae und Lupinus. Bedeutende Nutzpflanzenvertreter der Familie Brassicaceae sind Raps, Rettich, Senf und Kohlarten (MASTERS, 2019: 59) (MORGAN ET AL., 2005: 4).

Insgesamt können Ektomykorrhiza und Endomykorrhiza unterschieden werden. Im Falle der Ektomykorrhiza dringen die Pilzhyphen nicht in die einzelne Wurzelzelle ein, sondern besiedeln die Pflanzenwurzel extrazellulär. Im Gegensatz dazu zeichnen sich Endomykorrhiza durch die Penetration der Zellwände und -membranen aus und besiedeln die Pflanzenwurzel somit intrazellulär (ISLAM ET AL., 2020: 7).

Endomykorrhiza umfassen arbuskulare, ericoide und orchide Mykorrhiza als Unterkategorien, wobei arbuskulare Mykorrhizae (AM) insgesamt die bedeutendste Gruppe der Mykorrhiza-Pilze ausmachen. Bisher wurden zwischen 150 und 200 Arten von AM entdeckt und beschrieben, wobei alle der Familie Glomeromycota angehören (MORGAN ET AL., 2005: 5). Der Nährstoffaustausch zwischen Pflanzen und AM findet über Vesikel ähnliche Strukturen statt die nach der Penetration der Wurzelzelle produziert werden (ISLAM ET AL., 2020: 7).

Ein bedeutender pflanzenbaulicher Vorteil ergibt sich aus einer verbesserten Aneignung von knappen Ressourcen wie Wasser und Nährstoffen durch AM. Der Haupteffekt entsteht dabei durch eine erhebliche Zunahme des für die Nährstoff- und Wasseraneignung nutzbaren Bodenvolumens, da sich die Pilzhyphen in horizontaler als auch vertikaler Richtung deutlich weiter ausbreiten als die Pflanzenwurzeln (MORGAN ET AL., 2005: 4). Insbesondere bei Pflanzen mit wenigen oder kurzen Feinwurzeln (Wurzelhaaren) kann so das Bodenvolumen aus dem Ressourcen aufgenommen werden können um das bis zu 40-fache gesteigert werden (MASTERS, 2019: 56) (HALLAMA ET AL., 2019: 18). Zudem sind Pilzhyphen gegenüber Pflanzenwurzeln in der Lage in extrem schmale Hohlräume und Poren vorzudringen, was insbesondere in verdichteten Böden mit einem geringen Grobporenanteil von besonderer Bedeutung für die Nährstoffversorgung der Pflanzen ist. Darüber hinaus sind Mykorrhiza-Pilze ebenso wie bestimmte PGPR in der Lage über die Synthese und Ausscheidung von organischen Säuren und Enzymen fixierte mineralische sowie organische P-Formen pflanzenverfügbar zu machen. Die bedeutendsten Vertreter in diesem Zusammenhang sind *Aspergillus* und *Penicillium* (KHAN ET AL., 2010: 4 ff.) (RAHMAN ET AL., 2021: 5) (HALLAMA ET AL., 2019: 18 ff.).

Neben einer verbesserten Nährstoffaneignung kommt insbesondere Bodenzwischenpilzen der Gattung *Glomus* und *Trichoderma* eine besondere Bedeutung in Bezug auf die Unterdrückung von Pflanzenkrankheiten wie beispielsweise Wurzelfäule zu, die von phytopathogenen Pilzen der Gattung *Fusarium*, *Verticillium* oder *Rhizoctonia* verursacht werden können (FRAC ET AL., 2018: 4) (RAHMAN ET AL., 2021: 4).

Archaeen

Archaeen können zwischen 0,5 und 10 % der gesamten im Boden befindlichen Einzeller (Bakterien und Archaeen) ausmachen. Diese relativ einfachen aber sehr widerstandsfähigen Organismen sind maßgeblich am Recycling von Nährstoffen wie Kohlenstoff, Stickstoff und Schwefel beteiligt (MASTERS, 2019: 55 ff.) (ISLAM ET AL., 2020: 8) (RAHMAN ET AL., 2021: 5). Archaeen sind in der Lage Methan (CH_4) zu produzieren und zu oxidieren und spielen eine bedeutende Rolle bei der Assimilation von Kohlenstoff, da sie in der Lage sind Kohlenstoff aus Bikarbonat (HCO_3^-) und Kohlenstoffdioxid (CO_2) abzuspalten (ISLAM ET AL., 2020: 8) (RAHMAN ET AL., 2021: 5). In Bezug auf den Stickstoffkreislauf kommt Ammoniak/Ammonium-oxidierenden-Archaeen (AoA) eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere Archaeen der Gattung *Thaumarchaeota* oxidieren Ammoniak und Ammonium mittels Ammoniak-Monooxygenase-Enzymen was letztlich zu der Bildung von Nitrat führt. Dies wiederum führt zu einer verstärkten Nitratauswaschung und damit erhöhten Stickstoffverlusten, da Nitrat äußerst mobil ist im Boden. Zudem erhöht die Nitratkonzentration im Boden die Emissionen von Lachgas, dessen Bedeutung als extrem potentes klimarelevantes Treibhausgas mit einer 289 mal höheren Treibhauswirkung als CO_2 bereits herausgearbeitet wurde (ISLAM ET AL., 2020: 8). Da AoA relativ häufig in Böden vorkommen, kann davon ausgegangen werden, dass AoA eine der Hauptquellen von Lachgasemissionen sind.

Viren

Bei Viren handelt es sich um extrem kleine Parasiten, die sich nur in Wirtszellen vermehren können. Schätzungen gehen davon aus, dass sich in einem Gramm Boden zwischen 100.000.000 und 10.000.000.000 Viren befinden (ISLAM ET AL., 2020: 9). Insgesamt sind Viren und deren Bedeutung in Agrarökosystemen noch relativ unerforscht. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass sie maßgeblich an der Evolution des Bodenlebens beteiligt sind, da sie Gene von Wirt zu Wirt übertragen und somit zur Weiterentwicklung beitragen können (SHAH ET AL., 2021: 4 ff.) (MASTERS, 2019: 54).

Protozoen

In Böden befinden sich zwischen 10.000 und 1.000.000 Protozoen pro Gramm Boden, die als Einzeller mit Zellkern charakterisiert werden können (ISLAM ET AL., 2020: 9). Insgesamt können drei Gruppen von Protozoen unterschieden werden: Amöben, Ciliate und Flagellate, wobei deren Häufigkeit maßgeblich von Bodenfeuchte und Bodentextur abhängt. So sind Flagellate die dominierende Protozoengruppe unter trockenen Bedingungen und auf feinstруктуриerten Tonböden, während Ciliate feuchte Bedingungen und grob texturierte Böden bevorzugen (ISLAM ET AL., 2020: 11) (MASTERS, 2019: 59). Zudem haben ISLAM ET AL., 2020: 11 festgestellt, dass die Protozoen Population maßgeblich von lebenden Pflanzenwurzeln und deren Exsudaten und organischer Substanz beeinflusst wird. Protozoen sind besonders bedeutsam für die Aufrechterhaltung des mikrobiellen Gleichgewichtes im Boden, da sie sich hauptsächlich von Bakterien ernähren (SHAH ET AL., 2021: 3) (ISLAM ET AL., 2020: 11). So kann ein Einzeller bis zu 10.000 Bakterien pro Tag vertilgen (MASTERS, 2019: 59).

Regenwürmer

Wie bereits beschrieben ist eine gute Bodenstruktur eine essenzielle Voraussetzung für eine nachhaltige und ertragsreiche Nahrungsmittelproduktion. Konventionelle Pflanzenproduktionssysteme können durch die Verursachung von Bodenschadverdichtungen oder intensiven Bodenbearbeitungsverfahren schnell an ihre Grenzen stoßen, was den Aufbau und den Erhalt einer vorteilhaften Bodenstruktur betrifft. Regenwürmer können hier einen wertvollen Beitrag leisten, die Bodenstruktur durch ihre Grabetätigkeit zu verbessern. Dabei werden durch die Ausscheidung von vermischten organischen Materialien mit mineralischen Bodenbestandteilen große stabile Bodenaggregate geschaffen, die deutlich stabiler gegenüber mechanischer Belastung durch z.B. Regentropfen sind und dadurch letztlich auch das Erosionsausmaß reduzieren. Diese Regenwurmausscheidungen können mit 2-10 kg/m² in gemäßigttem Klima eine beachtliche Bodenschicht von 5-25 mm ausmachen (BERTRAND ET AL., 2015: 5).

Zudem können Regenwürmer die Wasserinfiltrationskapazität des Bodens durch das Graben von Gängen und der damit verbundenen Generierung von Makroporen signifikant erhöhen, wodurch Oberflächenabfluss erheblich reduziert werden kann. So konnte in einer Untersuchung von BOUCHÉ u. AL-ADDAN, 1997 eine eindeutige Korrelation zwischen

Regenwurmbiomasse und Wasserinfiltrationsrate nachgewiesen werden. Dabei wurde abgeleitet, dass die Wasserinfiltrationsrate um 150 mm/h je 100 g Regenwurmbiomasse/m² ansteigen kann (BERTRAND ET AL., 2015: 4 ff.). Damit übereinstimmend ist das Versuchsergebnis von VALCKX ET AL., 2010 die bei drei verschiedenen Bodenbearbeitungsintensitäten und einer Reduzierung, Zunahme oder gleichbleibenden Zahl der anektischen Regenwurmbiomasse festgestellt haben, dass die Erosionsraten in Abhängigkeit der anektischen Regenwurmbiomasse exponentiell reduziert wurden (BERTRAND ET AL., 2015: 5).

Insgesamt können drei verschiedene Regenwurmgruppen unterschieden werden, die sich maßgeblich in Bezug auf das Gangsystem unterscheiden: (I) Anektische Regenwurmarten graben Gänge mit großem Durchmesser (> 1 mm Durchmesser), die überwiegend vertikal bis in den Unterboden verlaufen (> 1 m Tiefe im Bodenprofil). (II) Endogäische Regenwurmgänge sind nicht unbedingt vertikal orientiert, ihr Durchmesser ist kleiner und sie reichen nicht so tief in den Unterboden. (III) Epigäische Regenwurmarten halten sich hauptsächlich in der obersten Bodenschicht bis 5 cm Bodentiefe auf, weshalb sie für die Erhöhung der Wasserinfiltrationskapazität von geringerer Bedeutung sind (BERTRAND ET AL., 2015: 5). Demnach kommt beim Vergleich der Gang Morphology insbesondere anektischen Regenwurmarten eine besondere Bedeutung in Hinblick auf die Erhöhung der Infiltrationsrate und einer damit verbundenen Erosionsminderung zu.

Neben der Bedeutung für die Struktur und die wasserbezogenen Eigenschaften des Bodens, sind Regenwürmer auch maßgeblich am Kohlenstoff Kreislauf beteiligt. So nutzen anektische und epigäische Regenwurmarten unzersetztes organisches Material an der Bodenoberfläche als Hauptfutterquelle und arbeiten es in den Boden ein. Endogäische Regenwurmarten hingegen nehmen hauptsächlich Bodenpartikel auf und nur einen geringen Anteil organischer Substanz. Im Verdauungsprozess wird das aufgenommene organische Material dann zerkleinert und mit Boden vermischt. Anschließend tragen diese organisch-mineralischen Komplexe als Regenwurmausscheidungen, die eine hohe mikrobielle Aktivität aufweisen, maßgeblich zur Verbesserung der Bodenstruktur und der Nährstoffversorgung bei (BERTRAND ET AL., 2015: 5 ff.).

Es wird zudem vermutet, dass Regenwürmer einen positiven Einfluss auf die Stabilisierung der organischen Substanz des Bodens haben, da sie organisches Material durch die Futteraktivität, verbunden mit ihrer Grabeaktivität in tiefere Bodenschichten transportieren, wo die Mineralisationsraten auf Grund geringerer mikrobieller Aktivität reduziert sind. Somit kann ein Teil des durch organische Materialien eingetragenen Kohlenstoffs gegen einen unverminderten Abbau geschützt und somit die C_{org} -Gehalte des Bodens langfristig erhöht werden (BERTRAND ET AL., 2015: 5 ff.).

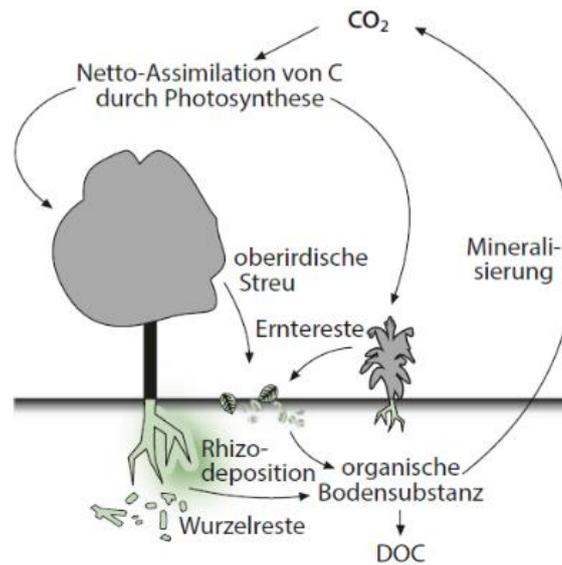
4.2 Erhalt und Aufbau von Humus

In zahlreichen Studien wurde die Bedeutung der oben beschriebenen Bodenlebewesen für die Gesundheit des Bodens nachgewiesen. Eine zentrale Komponente der Bodengesundheit ist die Struktur des Bodens, die zahlreiche Prozesse von der Wurzelentwicklung über den Wasser- und Luftaustausch bis hin zu der Nährstoffverfügbarkeit beeinflusst. Zu Beginn dieser Arbeit wurden mit der Bodenerosion und Bodenschadverdichtung Prozesse erläutert, die sich negativ auf die Struktur des Bodens auswirken. In diesem Abschnitt soll deshalb dargestellt werden, wie ein gesundes Bodenleben zur Verbesserung der Bodenstruktur beitragen kann, die eine wesentliche Komponente der Bodengesundheit ist.

Es besteht ein enger Zusammenhang zwischen Bodenlebewesen und dem Humusgehalt des Bodens. Als Humus wird „die Gesamtheit der abgestorbenen organischen Substanz im Boden“ bezeichnet und ist als „ein komplexisches Gemisch von organischen Stoffen aus pflanzlicher, tierischer und mikrobieller Herkunft zu verstehen, das permanenten Ab-, Um- und Aufbauprozessen unterliegt“ (KOLBE ET AL., 2015: 7). Im Allgemeinen wird angenommen, dass Humus zu ungefähr 58 % aus C_{org} besteht, so dass mit der folgenden Gleichung von C_{org} auf den Humusgehalt geschlossen werden kann:

C_{org} -Gehalt x 1,724 = Humusgehalt (gemessen in % der Trockenmasse des Bodens)
(KOLBE ET AL., 2015: 17).

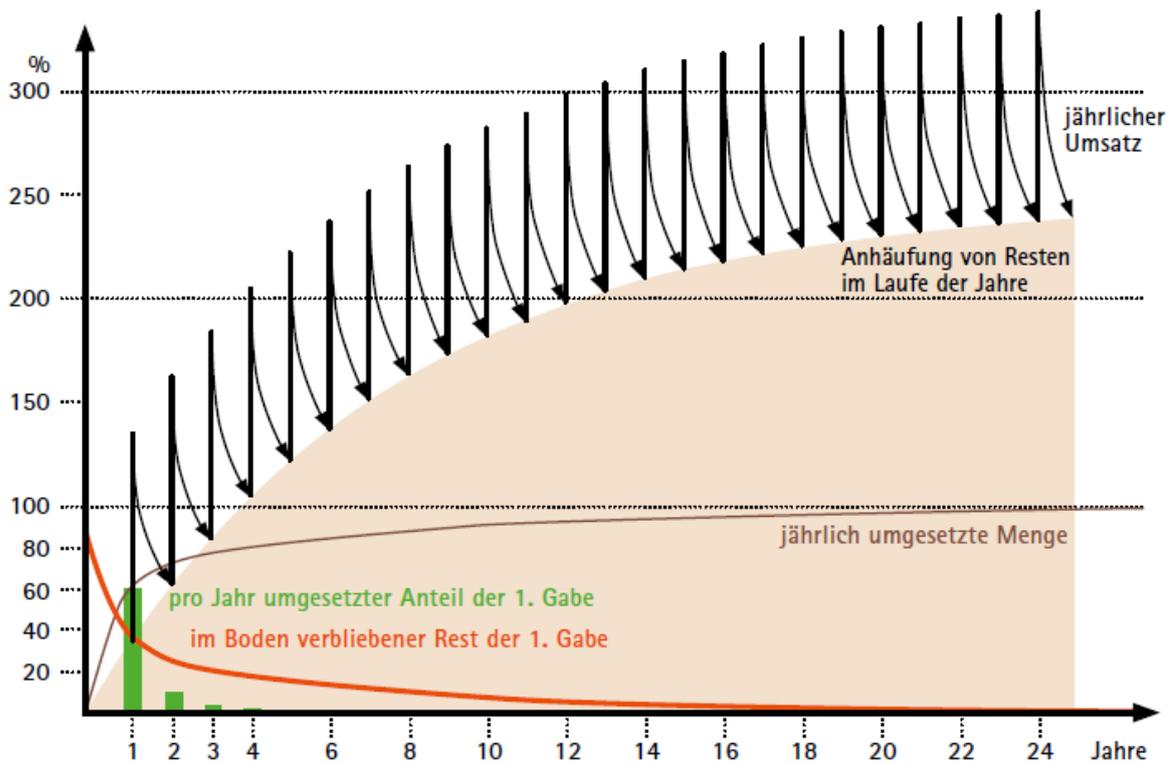
Abbildung 7: Wege des Kohlenstoffs in den Boden



Quelle: SCHEFFER ET AL., 2018: 85

In Abbildung 7 sind die beiden bedeutendsten Wege des organischen Kohlenstoffeintrages in den Boden dargestellt, wobei die Photosynthese mit der Assimilation von atmosphärischem CO₂ als grundlegende Reaktion für beide Prozesse des Kohlenstoffeintrages angesehen werden kann. Die eine bedeutende C_{org}-Quelle ist z.B. pflanzliches Spross- und Wurzelmaterial, welches in Form von Ernterückständen auf dem Feld verbleibt und dann als abgestorbenes organisches Material in die organische Substanz (OS) des Bodens eingebaut wird (Decomposition Pathway). Die zweite wichtige C_{org}-Quelle umfasst die Absonderung von kohlenstoff-basierten Substanzen, wie z.B. Kohlenhydraten über lebende Wurzeln in die Rhizosphäre während des Pflanzenwachstums (Liquid Carbon Pathway) (KUZYAKOV U. DOMANSKI, 2000: 1). Während der C_{org}-Eintrag über den Decomposition Pathway relativ gut erforscht ist, stellen STOCKMANN ET AL., 2013: 5 fest, dass die Bedeutung des Liquid Carbon Pathway in Bezug auf die Humusgehalte in der wissenschaftlichen Literatur erheblich variiert, da die Erforschung exakter Mengen und Strukturen der kohlenstoff-basierten Wurzelexsudate im komplexen System „Boden“ eine große Herausforderung darstellt (STOCKMANN ET AL., 2013: 5) (KUZYAKOV U. DOMANSKI, 2000: 2). Schätzungen gehen davon aus, dass C_{org}-Einträge über Wurzelexsudate 5-33 % der täglichen photosynthetischen C-Assimilation ausmachen (KUZYAKOV U. DOMANSKI, 2000: 2).

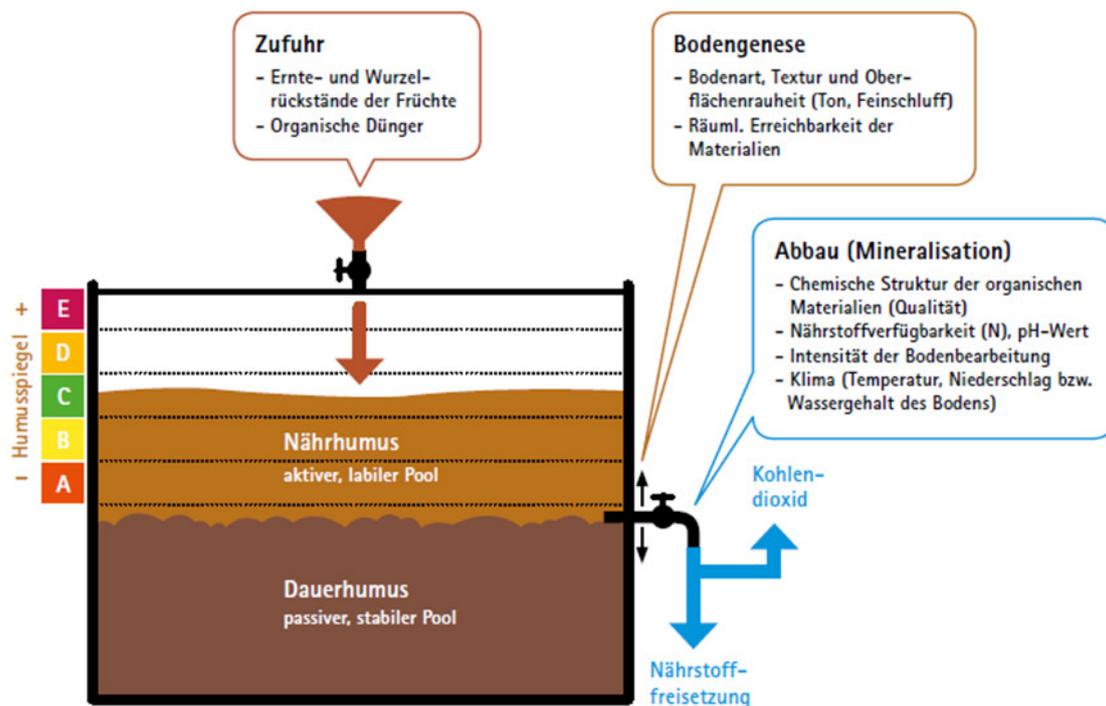
Abbildung 8: Anhäufung, Abbau und Umsatz nach jährlicher Zufuhr einer gleichbleibenden Menge an organischer Substanz im Boden



Quelle: KOLBE ET AL., 2015: 7

In Abbildung 8 ist das grundlegende Prinzip des Humusumsatzes dargestellt, welches als dynamisches Fließgleichgewicht aus Zufuhr und Abbau von C_{org} angesehen werden kann. Dies impliziert, dass es bei einer jährlich gleichbleibenden Zufuhr an organischer Substanz, z.B. in Form einer gleichhohen Menge an Ernterückständen, nicht zu einer stetig linearen Anreicherung an stabilisierten Humusformen kommt. Stattdessen stellt sich eine von Jahr zu Jahr geringer werdende Anreicherung an Humus ein. Letztendlich kommt es durch Aufsummierung der jährlich übergebliebenen Abbaumengen der jährlichen Einzelgaben zu der typischen kumulativen Gesamtwirkung auf die C_{org} -Gehalte des Bodens und das Fließgleichgewicht aus Zufuhr und Abbau ist erreicht. Demnach führt eine stetig höhere Zufuhr an organischer Substanz auch zu einem Anstieg der Humusgehalte im Boden (KOLBE ET AL., 2015: 7) (STOCKMANN ET AL., 2013: 15) (BELL U. LAWRENCE, 2019: 4) (LAL ET AL., 2015: 4).

Abbildung 9: Einflussgrößen der Zufuhr und des Abbaus von C_{org}



Quelle: KOLBE ET AL., 2015: 5

Ob sich das dynamische Fließgleichgewicht in eine positive oder negative Richtung verschiebt, hängt maßgeblich von den in Abbildung 9 dargestellten biotischen und abiotischen Faktoren der Zufuhr und des Abbaus von C_{org} ab. Die Zufuhrseite wird dabei neben organischen Düngemitteln, und abgestorbenen Bodenlebewesen hauptsächlich von der Zusammensetzung und Menge der Ernte- und Wurzelrückstände, Zwischenfrüchten sowie Wurzelexsudaten bestimmt, während der Abbau (Mineralisation) entscheidend von abiotischen Faktoren wie dem Klima (insbesondere Temperatur und Niederschlag) sowie managementbezogenen Parametern wie der Intensität der Bodenbearbeitung oder dem pH-Wert beeinflusst wird (KOLBE ET AL., 2015: 8) (STOCKMANN ET AL., 2013: 4 ff.). Die managementbezogenen Parameter werden im nachfolgenden Kapitel detaillierter behandelt. Ein weiterer bedeutender Faktor, der den Verlust von C_{org} betrifft, ist die Bodenerosion und dem damit verbundenen Verlust des C_{org} -reichen Oberbodens, deren Reduzierung oder Vermeidung eine zentrale Voraussetzung für den Aufbau von Humus ist (LAL ET AL., 2015: 2).

Zudem werden in Abhängigkeit der Verweildauer im Boden (Zeit von Zuführung bis Abbau) unterschiedliche Humusfraktionen oder -pools unterschieden. In Abbildung 9 werden mit Nährhumus und Dauerhumus zwar nur zwei verschiedene Fraktionen unterschieden, in anderen wissenschaftlichen Publikationen werden jedoch häufig mindestens drei verschiedene Pools genannt:

- (1) Ein aktiver labiler Pool mit Umsatzraten von Monaten oder Jahren (z.B. Wurzelexsudate, grünes Pflanzenmaterial).
- (2) Ein „intermediate“ Pool mit Umsatzraten von Jahrzehnten (z.B. verholztes Pflanzenmaterial).
- (3) Ein passiver stabiler Pool mit Umsatzraten von Jahrhunderten oder Jahrtausenden (Durch physikalische oder chemische Prozesse stabilisierte organische Substanz) (STOCKMANN ET AL., 2013: 6 ff.).

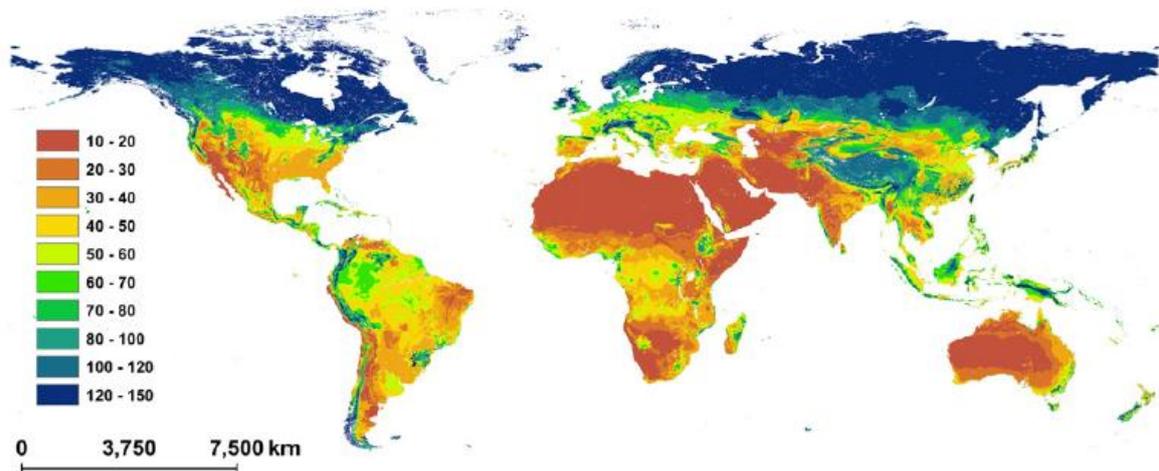
Welchem Pool ein bestimmtes organisches Material zugeordnet werden kann, hängt dabei maßgeblich von der chemischen Zusammensetzung ab. So nimmt im Allgemeinen die Umsatzrate mit steigenden Ligningehalten und weiten C:N-Verhältnissen ab (STOCKMANN ET AL., 2013: 6). Lignin gehört zu den langkettigen Kohlenhydraten, sorgt für die Verholzung von z.B. Pflanzenstängeln und kann von der Mehrheit der Bodenlebewesen nicht oder nur sehr langsam zersetzt werden. Ein weites C:N-Verhältnis ist bedeutend für die Abbaugeschwindigkeit, da Bodenmikroorganismen bei dem Abbau von organischem Ausgangsmaterial Stickstoff in ihre eigene Biomasse einbauen. So kann davon ausgegangen werden, dass Weizenstroh mit hohen Ligningehalten und einem weiten C:N-Verhältnis langsamer abgebaut wird als grünes Pflanzenmaterial mit geringen Ligningehalten und einem engen C:N-Verhältnis.

Darüber hinaus kann es durch Prozesse wie der Bildung von Ton-Humus-Komplexen, bei der Abbauprodukte der organischen Substanz unter direkter Beteiligung von Bodenlebewesen und Kationen wie z.B. Ca^{2+} und Mg^{2+} mit den mineralischen Bestandteilen des Bodens (Tonminerale) verbunden werden zur Stabilisierung und damit dem Übergang der organischen Substanz in den „intermediate“ oder „passiven“ Pool kommen (KOLBE ET AL., 2015: 9).

C-Sequestration (SCS)

Global betrachtet wird die Menge an C die im Boden bis zu 1 Meter Tiefe gespeichert ist auf 2500 Milliarden Tonnen geschätzt. 1500 Milliarden Tonnen davon sind organisch gebunden, so dass Böden als der größte terrestrische C_{org} -Pool gelten. Demgegenüber werden jährlich ungefähr 8,7 Milliarden Tonnen C aus anthropogenen Quellen (z.B. fossile Brennstoffe) emittiert. In Anbetracht der Größe des terrestrischen C_{org} -Pools können bereits geringe Zunahmen (oder Abnahmen) der im Boden gespeicherten C_{org} -Menge erheblichen Auswirkungen auf die atmosphärische C-Konzentration haben (STOCKMANN ET AL., 2013: 1) (ZOMER ET AL., 2017: 1).

Abbildung 10: Globale C-Vorräte im Oberboden (0-30 cm Tiefe) in Tonnen C pro Hektar



Quelle: MINASNY ET AL., 2017: 4

Die dargestellten globalen C-Vorräte in Abbildung 10 wurden auf Basis von Datensätzen generiert, die im Rahmen einer Studie von STOCKMANN ET AL., 2015 veröffentlicht wurden. Anhand dieser Abbildung können zwei Aspekte abgeleitet werden:

- (1) Die globale C_{org} -Verteilung variiert erheblich in Abhängigkeit der betrachteten Breitengrade, wobei nördlichere Breitengrade im allgemeinen deutlich höhere C_{org} -Gehalte aufweisen. Dieser Zusammenhang kann durch ein kühleres Klima und höhere Niederschlagsmengen erklärt werden. Die Regionen rund um den Äquator weisen dagegen deutlich geringere C_{org} -Gehalte auf, wegen des deutlich wärmeren Klimas.

- (2) Insgesamt sind die C_{org} -Gehalte in bedeutenden ackerbaulich genutzten Regionen, wie den USA, Südamerika und Australien mit Werten zwischen 10-50 Tonnen C pro Hektar relativ niedrig.

(ZOMER ET AL., 2017: 3) (MINASNY ET AL., 2017: 19)

Daraus ergibt sich das Potential der C-Sequestrierung (SCS) mit dem Ziel CO_2 aus der Atmosphäre in Form von C_{org} langfristig im Boden zu speichern. Die grundlegende Reaktion ist dabei die Photosynthese, bei der unter Einwirkung von Sonnenlicht Wasser und CO_2 in C-haltige Verbindungen und Sauerstoff umgewandelt werden (LAL ET AL., 2015: 1) (STOCKMANN ET AL., 2013: 15).

Das Potential der C-Sequestrierung, insbesondere mit Blick auf die Treibhausgasemissionen und dem damit verbundenen Klimawandel, wurde auch von politischen Entscheidungsträgern erkannt. So wurde auf der UN-Klimakonferenz in Paris im Jahr 2015 die sogenannte „4 per mille Initiative“ vorgestellt und von 150 Beteiligten unterschrieben, deren Ziel die Erhöhung der globalen Humusvorräte um 0,4 % pro Jahr ist. Durch die Speicherung von zusätzlichem Kohlenstoff im Boden sollen die anthropogenen Treibhausgasemissionen kompensiert werden (MINASNY ET AL., 2017: 3). Dabei stützt sich die Relevanz der C-Sequestrierung insbesondere auf die folgenden drei Aspekte:

- (1) Die Größe des terrestrischen C-pools, wodurch bereits geringe Zunahmen zu erheblichen Veränderungen der atmosphärischen C-Konzentration führen können.
- (2) Der Verlust von erheblichen Mengen C_{org} über die letzten Jahrhunderte durch Landnutzungsänderungen (z.B. Umwandlung von Dauergrünland in Ackerland) und unvorteilhaftes Landmanagement (z.B. Winterbrachen, Pflugeinsatz etc.) mit der Folge von Bodenerosion. Schätzungen gehen davon aus, dass in den letzten Jahrzehnten 50-70 % der C_{org} -Gehalte von landwirtschaftlich genutzten Böden verloren gegangen sind, was bezogen auf die Ackerflächen der USA beispielsweise ein Verlust von 5 Milliarden Tonnen C oder 34 Tonnen C pro ha bedeuten würde. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass die Böden durch die Einführung von optimierten Bewirtschaftungsmaßnahmen zumindest in einem gewissen Maße als „Kohlenstoffsene“ fungieren können.
- (3) Die Größe der Fläche, die weltweit ohnehin unter landwirtschaftlicher Bewirtschaftung steht und dadurch ohne besondere Vorbereitungen aber durch angepasstes Management positiv verändert werden kann (STOCKMANN ET AL., 2013: 15 ff.) (ZOMER ET AL., 2017: 1 ff.) (LAL ET AL., 2015: 3) (BAKER ET AL., 2006: 1).

Tabelle 1: Auswirkungen einer Erhöhung des Versorgungsgrades mit OS vom Niveau der Unterversorgung (= 100 %) auf einen guten bis sehr guten Versorgungszustand (um ca. + 500 kg Humusäquivalente (HÄQ) / ha) auf physikalische, chemische und biologische Eigenschaften der Bodenfruchtbarkeit

| Merkmale | Veränderung (in %) |
|--|---|
| Physikalische Eigenschaften | |
| Lagerungsdichte | -2 bis -13 |
| Porenvolumen | +1 bis 3,5 |
| Aggregatstabilität | +8 bis +34 |
| Anteil Makroporen | +8 bis +11 |
| Infiltrationsrate (Wasser) | +27 bis +80 |
| Chemische Eigenschaften | |
| C _{org} - und N _t -Gehalte | +30 |
| Potenzielle N-Mineralisierung | +26 bis +33 |
| <u>Effektive Kationenaustauschkapazität</u> | S +20 L +10 |
| Biologische Eigenschaften | |
| Mikrobielle Biomasse | +6 bis +50 |
| Regenwurmdichte | +38 bis +40 |
| Fruchtartenertrag | MW +10 (kon) bis +33 (öko) MAX +123 (kon) bis +127 (öko) |

S = Sand; L = Lehm; kon = konventioneller Landbau; öko = ökologischer Landbau; MW = Mittelwert; MAX = Maximale Werte

Humusäquivalente (HÄQ) sind ein Maß, um die sehr unterschiedliche Humusproduktionsleistung verschiedener organischer Materialien vergleichen zu können.

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an KOLBE ET AL., 2015: 9

Neben dem Potential der SCS das Fortschreiten des Klimawandels auszubremsen, ergeben sich für den Landwirt direkte Vorteile durch positive Veränderungen zahlreicher Parameter der Bodenfruchtbarkeit wie in Tabelle 1 dargestellt, wodurch letztlich höhere Erträge erzielt werden können. Insbesondere die physikalischen Parameter der Bodenfruchtbarkeit, wie

beispielsweise die Aggregatstabilität, der Anteil Makroporen und die damit verbundene Erhöhung der Wasserinfiltrationsrate sind besonders relevant in Hinblick auf die Vermeidung von bereits erläuterten Problemen wie der Bodenerosion oder -schadverdichtung (ZOMER ET AL., 2017: 5) (LAL, 2016: 5).

Hinsichtlich der Größenordnung des C_{org} -Eintrages im Zuge der SCS werden in der wissenschaftlichen Literatur unterschiedliche Zahlen genannt. Diese reichen von 0,1 bis 0,5 Tonnen C_{org} pro Hektar, was bei einer globalen Ackerfläche von 1,6 Milliarden Hektar einen C_{org} -Eintrag von 0,16-0,8 Milliarden Tonnen bedeuten würde (LAL ET AL., 2015: 5) (MINASNY ET AL., 2017: 3). Die Spannweite der genannten Werte variiert je nach Region verständlicherweise erheblich und ist neben der Frage wie konsequent sogenannte „best management practices“, wie z.B. Direktsaat und Zwischenfruchtanbau umgesetzt werden auch abhängig von den C_{org} -Ausgangsgehalten und dem betrachteten Zeithorizont. So ist der Aufwand einer zusätzlichen C-Sequestrierung auf Standorten mit hohen C_{org} -Ausgangsgehalten deutlich höher als auf Standorten mit niedrigen C_{org} -Ausgangsgehalten (bei gleichen klimatischen Bedingungen) auf Grund des höheren Niveaus des offenen Fließgleichgewichtes. Zudem ist die Rate der C-Sequestrierung auf Grund der typischen C_{org} -Akkumulationskurve (siehe Abbildung 8) in den ersten Jahren nach Einführung optimierter Managementmaßnahmen deutlich erhöht und flacht zum Erreichen des Fließgleichgewichtes hin signifikant ab (MINASNY ET AL., 2017: 19 ff.).

Insgesamt muss das übergeordnete Ziel des Humusmanagements ein standortangepasster C_{org} -Gehalt sein, dessen Aufbau und Erhaltung stark von zahlreichen biotischen und abiotischen Faktoren, wie beispielsweise Temperatur, Niederschlag oder Managementmaßnahmen, beeinflusst wird. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass ein großer Teil der globalen Ackerflächen einen Humusgehalt weit unterhalb des standortspezifischen Optimums aufweist, insbesondere in den Hauptanbaugebieten wie den USA, Südamerika und Australien. LAL, 2016: 5 konnte sogar einen kritischen C_{org} -Gehalt im Wurzelbereich von 1,5 bis 2 % feststellen. Unterhalb dieser C_{org} -Konzentration kann es zu zahlreichen negativen Auswirkungen in Bezug auf wichtige Parameter der Bodengesundheit, wie z.B. die Bodenstruktur, die Bodenbelüftung, das Wasserhaltevermögen und das Nährstoffaneignungsvermögen kommen. Demnach sind besonders Flächen mit solch geringen C_{org} -gehalten für die C-Sequestrierung prädestiniert, da hier die Reduzierung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration mit der dringend

notwendigen Optimierung wichtiger Bodenfunktionen kombiniert werden können. Trotzdem ist und bleibt die langfristige Sequestrierung von C auf Grund des dargestellten Prinzips des Humusumsatzes (offenes Fließgleichgewicht) eine Herausforderung, die das Potential der globalen Ackerfläche als C-Senke in Frage stellt. Neben der Sequestrierung von C ist auch die Vermeidung von C-Verlusten mindestens genauso wichtig. Hier kommt Moorböden mit besonders hohen Humusgehalten (> 30 %) eine bedeutende Rolle zu: Werden diese Flächen einer Landnutzungsänderung (z.B. Umwandlung in Ackerland) unterzogen, kommt es zu erheblichen C_{org}-Verlusten und damit auch zu erheblichen C-Emissionen, die wiederum den Klimawandel verstärken (ZOMER ET AL., 2017: 3).

4.3 Glomalin als bedeutende Substanz für die Bodenstruktur

Eine Substanz mit großer Bedeutung für die Struktur und Stabilität des Bodens, die eng mit den C_{org}-Gehalten verknüpft ist, ist das sogenannte Glykoprotein Glomalin. Einerseits ist Glomalin eine der bedeutendsten C-Quellen im Bodenumus und andererseits erhöht es die Verweilzeit von C_{org} im Boden durch das Binden von Bodenpartikeln, wodurch letztlich die C-Sequestrierung begünstigt wird (SILVA MATOS ET AL., 2022: 4) (JOHNSON ET AL., 2015: 10).

Bei Glomalin handelt es sich um ein Protein, welches in den Hyphenwänden und Sporen von arbuskularen Mykorrhiza-Pilzen vorkommt und ausschließlich von Mykorrhiza-Pilzen der Familie *Glomeromycota* in signifikanten Mengen produziert wird (SINGH ET AL., 2012: 2) (SILVA MATOS ET AL., 2022: 3). Zusammengesetzt ist dieses Protein aus circa 28-45 % Kohlenstoff, 0,9-7,3 % Stickstoff, 0,03-0,1 % Phosphor und einem geringen Metallanteil. Darüber hinaus ist Glomalin eine stabile Verbindung, die unlöslich in Wasser und resistent gegenüber Hitzeeinwirkung ist. Da es sich in der Natur kleberartig verhält, kann zudem davon ausgegangen werden, dass es hydrophobe (wasserabweisende) Eigenschaften aufweist (VLČEK UND POHANKA, 2020: 4) (SINGH ET AL., 2012: 4). In der wissenschaftlichen Literatur wird darauf aufmerksam gemacht, dass der Begriff „Glomalin“ eigentlich nur für ein einzelnes spezifische Protein genutzt werden sollte, welches bisher allerdings noch nicht isoliert werden konnte. Vorgeschlagen wird deshalb der Begriff „glomalin related soil protein (GRSP)“. In dieser Arbeit wird stattdessen der Einfachheit halber "Glomalin“ und „GRSP“ gleichbedeutend verwendet (RILLIG, 2004: 4 ff.).

Der Prozess der Glomalinfreisetzung, der unterschiedliche Primärfunktionen impliziert, ist nicht eindeutig geklärt. In der wissenschaftlichen Literatur werden zwei Theorien diskutiert:

- (1) Das Glomalin ist in den Pilzhyphen von arbuskularen Mykorrhizae eingebaut und wird erst freigesetzt nachdem der Pilz abgestorben ist und die Hyphen zersetzt werden. In diesem Fall umfasst die primäre Funktion des Glomalin mit großer Wahrscheinlichkeit eine Aufgabe im lebenden Mykorrhiza-Pilz.
- (2) Es kommt zu einer aktiven Absonderung von Glomalin in den Boden über die Pilzhyphen. Hier würde die Primärfunktion des Glykoproteins vermutlich in der Modifizierung des pilzlichen Lebensraumes liegen.

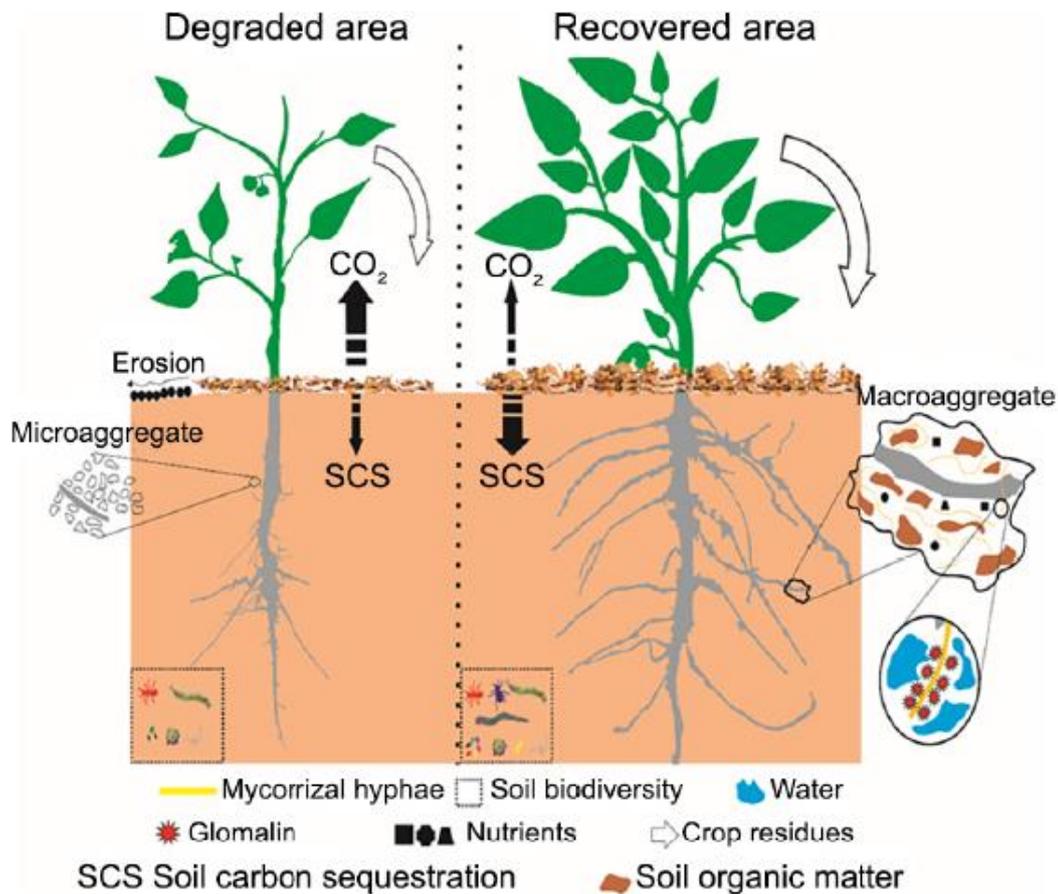
(VLČEK UND POHANKA, 2020: 3) (DRIVER ET AL., 2005: 2)

Eine Untersuchung von DRIVER ET AL., 2005 hat jedoch ergeben, dass 80 % des Glomalin in den Pilzhyphen gebunden war, so dass die Glomalinfreisetzung mutmaßlich zu einem überwiegenden Teil in Folge des Absterbens und der Zersetzung von Pilzhyphen erfolgt und nicht durch eine aktive Absonderung mittels lebender Pilzhyphen. Demnach bestimmen die Hyphendichte, der Glomalingehalt in den Hyphen sowie die Hyphenumsatzrate maßgeblich die Glomalinfreisetzung (RILLIG U. MUMMEY, 2006: 6) (SINGH ET AL., 2012: 3).

Insbesondere in Anbetracht des fortschreitenden Klimawandels und einer damit einhergehenden Häufung von Extremwetterereignissen, sind die Vorteile von AM und Glomalin hinsichtlich der Bodenstruktur besonders interessant. Einerseits wird die Bodenstruktur auf physikalischer Ebene durch die Verbindung von Bodenpartikeln mittels Pilzhyphen verbessert und die Stabilität dadurch erhöht. Andererseits fungiert das nach dem Absterben von Pilzhyphen freigesetzte Glomalin durch seine hydrophoben Eigenschaften als organisches Bindemittel, welches mineralische Bodenteilchen und Partikel organischer Substanz verklebt und somit die Bildung von stabilen Makroaggregaten signifikant erhöht (SILVA MATOS ET AL., 2022: 3). Untersuchungen haben einen stark positiven Zusammenhang zwischen dem Glomalingehalt im Boden und der Aggregatstabilität bei verschiedenen Bodentypen und unterschiedlichen klimatischen Bedingungen feststellen können, wobei es ab einer gewissen Glomalinkonzentration vermutlich einen Sättigungspunkt gibt (DRIVER ET AL., 2005: 1). Eine zusätzliche Glomalinfreisetzung führt dann nicht mehr zu einer Erhöhung der Aggregatstabilität. Insbesondere in intensiv bewirtschafteten Ackerbausystemen ist dies jedoch nicht als problematisch anzusehen, da der Glomalingehalt auf diesen Flächen ohnehin als eher gering einzuschätzen ist und hier

sogar eine lineare Beziehung zwischen Glomalinkonzentration und Aggregatstabilität angenommen werden kann (RILLIG, 2004: 6).

Abbildung 11: Schematische Darstellung der Haupteffekte von AM und Glomalin auf Boden und Pflanzen



Quelle: SILVA MATOS ET AL., 2022: 3

In Abbildung 11 sind die Effekte von AM und Glomalin auf Boden und Pflanzen zusammenfassend dargestellt. Insgesamt wird durch die Funktion als organisches Bindemittel zunächst die Bildung von stabilen Makroaggregaten gefördert, wodurch insgesamt die Bodenstruktur verbessert wird und damit auch die Verfügbarkeit von Nährstoffen und Wasser steigt. In der Folge kommt es zu einem optimierten Wurzelwachstum mit einer erhöhten Absonderung von Wurzelexsudaten, die ihrerseits wiederum die mikrobielle Diversität und Abundanz (Häufigkeit) fördern. Durch verschiedene mikrobielle Prozesse wie z.B. der Produktion von Phytohormonen oder Enzymen wird dann das Pflanzenwachstum positiv beeinflusst und es können höhere Erträge erzielt werden.

Damit verbunden ist ein höherer C_{org} -Eintrag durch mehr Wurzelexsudate und größere Mengen an Ernterückständen, die wiederum die potenzielle C-Sequestrierung positiv beeinflusst.

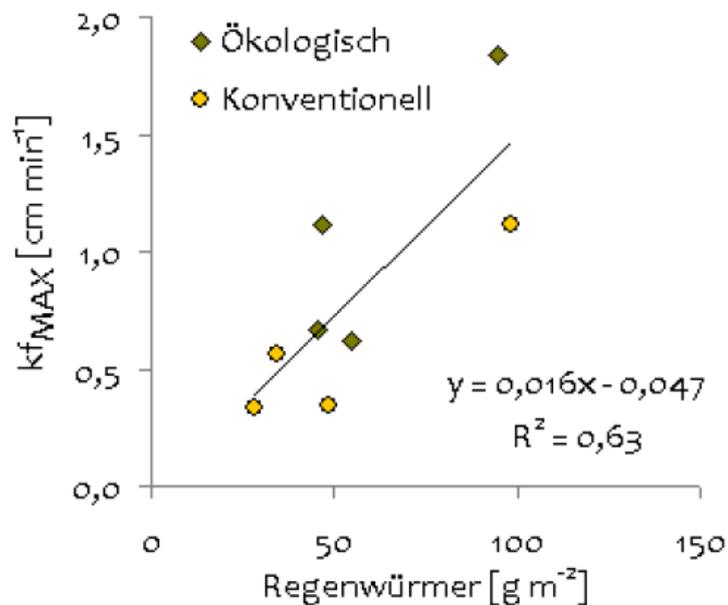
Demnach kann der Glomalingehalt, der eng mit der Dichte von AM und deren Hyphen zusammenhängt, als eine weitere wichtige Komponente der Bodengesundheit angesehen werden (SILVA MATOS ET AL., 2022: 7) und sollte bei der Bewirtschaftung durch angepasste Maßnahmen berücksichtigt werden.

4.4 Erhöhte Wasserinfiltration – Das Ergebnis eines gesunden Bodens

Wasser ist ein bedeutender Produktionsfaktor im Pflanzenbau, der das Ertragsniveau maßgeblich mitbestimmt. Auf der anderen Seite kann Wasser in Form von z.B. Niederschlagsereignissen Degradierungsprozesse, wie Bodenerosion, beträchtlich fördern. Wenn bei einem Niederschlagsereignis mehr Wasser angeliefert wird, als der Boden aufnehmen kann, fließt der Überschuss als Oberflächenwasser ab. Dieser Anteil ist umso größer, je intensiver die Niederschläge, je größer die Hangneigung und je langsamer die Niederschläge vom Boden aufgenommen werden (SCHEFFER ET AL., 2018: 294). Während die Niederschlagsintensität und die Hangneigung nicht beeinflusst werden können, kann die Menge an Sickerwasser pro Zeiteinheit (mm/min), ausgedrückt als Wasserinfiltrationsrate, durch angepasstes Management hingegen signifikant erhöht werden. HARTMANN ET AL., 2009: 5 ff. stellen in diesem Zusammenhang fest, dass der Landwirtschaft als weltweit größter Flächennutzer eine besondere Rolle in Bezug auf den Hochwasserschutz zukommt. Die dafür notwendige Erhöhung der Wasserinfiltrationsrate ist auch aus pflanzenbaulicher Sicht dringend erforderlich, da auf vielen Ackerflächen eine sogenannte „schleichende Versiegelung“ beobachtet werden kann. Dabei kommt es durch den Einsatz schwerer Maschinen und der Abnahme der biologischen Aktivität im Boden zu einer Degradierung der Boden- und Porenstruktur sowie eine Zunahme der Lagerungsdichte, die ihrerseits wiederum die Wasserinfiltration negativ beeinflussen und somit zu Trockenstress für die Pflanzen führen können (HARTMANN ET AL., 2009: 5).

Gemessen wird die maximale Infiltrationsrate über die Bestimmung der sogenannten „gesättigten Wasserleitfähigkeit (k_{fMAX})“, die angibt wie viel Wasser pro Zeiteinheit durch eine definierte Bodensäule sickert (HARTMANN ET AL., 2009: 19 ff.)

Abbildung 12: Beziehung der Regenwurmbiomasse und der gesättigten Wasserleitfähigkeit



Quelle: HARTMANN ET AL., 2009: 48

In Abbildung 12 ist eine eindeutige Korrelation zwischen der Regenwurmbiomasse und der maximalen Wasserinfiltrationsrate, ausgedrückt als gesättigte Wasserleitfähigkeit, zu erkennen. Dies zeigt, dass die Förderung von Bodenlebewesen wie Regenwürmern mit ihren bereits dargestellten zahlreichen Vorteilen auch besonders relevant in Hinblick auf die Erhöhung der Wasserinfiltrationsrate ist. Dieser Effekt wird hauptsächlich der Grabeaktivität und der damit verbundenen Generierung von Regenwurmgängen, oder auch Bioporen, zugeschrieben, die einen relativ großen Querschnitt sowie eine hohe Durchgängigkeit aufweisen und somit einen zentralen Faktor bei der Erhöhung der Wasserinfiltrationsrate darstellen (HARTMANN ET AL., 2009: 48 ff.). Weitere Faktoren mit Einfluss auf die Wasserinfiltrationsrate sind:

- Bodentextur- und -struktur
- Porosität und Permeabilität
- Fruchtfolge und Bodenbedeckung
- Lagerungsdichte und Verdichtungsgrad

- Wurzelentwicklung, organische Bodensubstanz und biologische Aktivität
- Bodenfeuchte
- Topografie

(HARTMANN ET AL., 2009: 5)

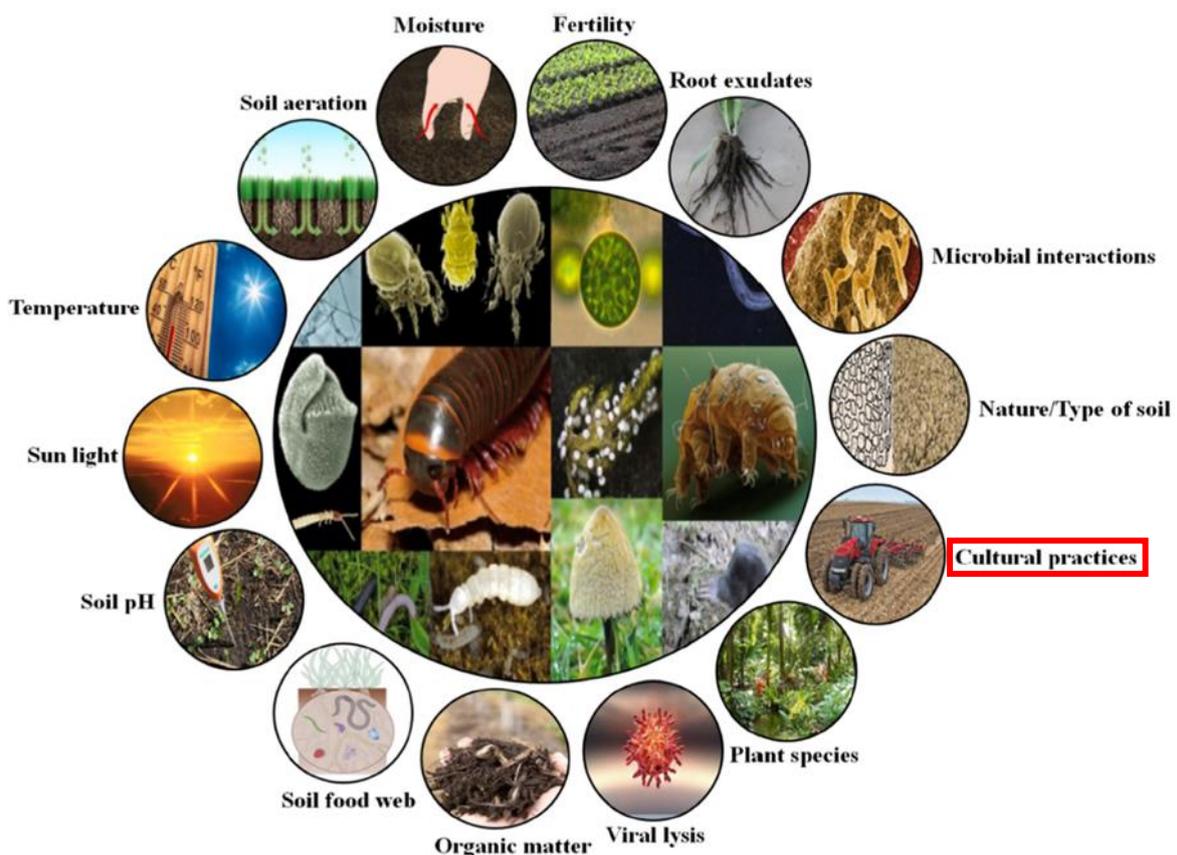
Die Bodentextur beeinflusst die Wasserinfiltration über die Korngrößenzusammensetzung. So weist ein feintexturierter Tonboden im Allgemeinen eine geringere Infiltrationskapazität auf als ein Sandboden mit deutlich gröberen Körnern. Mit Porosität ist zum einen der prozentuale Porenanteil gemeint und zum anderen auch die Porenverteilung aus Grob- und Feinporen, wobei Makroporen eine besondere Bedeutung hinsichtlich der Wasseraufnahme zukommt. Die Permeabilität meint die Verlagerung des Sickerwassers in tiefere Bodenschichten, so dass die oberen Bodenhorizonte nicht zu schnell wassergesättigt sind. Die Fruchtfolge und Bodenbedeckung beeinflusst die Wasserinfiltration einerseits durch die Bodenlockerung und die Generierung von Bioporen über das Wurzelsystem und zum anderen fungiert eine Mulchschicht aus Pflanzenmaterial an der Bodenoberfläche als eine Art „Schwamm“, der zusätzlich Wasser aufnehmen kann. Wie bereits beschrieben wirken sich Bodenschadverdichtungen äußerst negativ auf die Porosität und damit auch auf die Lagerungsdichte aus, wodurch die Wasseraufnahme erheblich beeinträchtigt wird. Der C_{org} -Gehalt beeinflusst viele der dargestellten Einflussfaktoren, wie die Porosität, Lagerungsdichte, Pflanzenentwicklung etc. positiv, so dass ein erhöhter Humusgehalt auch Vorteile hinsichtlich der Wasserinfiltration mit sich bringt. Auch die Bodenfeuchte ist natürlich entscheidend, da beispielsweise ein wassergesättigter Boden kein zusätzliches Wasser aufnehmen kann und es somit zur Staunässe oder Oberflächenabfluss kommen würde.

Wie bereits beschrieben gilt Wasser global betrachtet als limitierender Produktionsfaktor in vielen Ackerbauregionen. Neben der Niederschlagsmenge wird sich im Zuge des fortschreitenden Klimawandels insbesondere die Niederschlagsverteilung ändern, so dass größere Regenmengen in kürzerer Zeit auf die Ackerflächen treffen. Auf der anderen Seite kann es insbesondere in Frühjahrs- und Sommermonaten zu ausgeprägten Dürren kommen. Deshalb muss neben der Frage wie schnell Wasser in den Boden aufgenommen werden kann auch adressiert werden, wie gut dieses Regenwasser im Boden gehalten werden kann, so dass es den Pflanzen in Trockenperioden zur Verfügung steht (MINASNY U. MC BRATNEY, 2018: 1) (WILLIAMS ET AL., 2016: 1 ff.).

5 Anpassungsstrategien des zukunftsorientierten Pflanzenbaus zur Förderung der Bodengesundheit

In den vorhergehenden Abschnitten wurde ausführlich die Bedeutung von organischer Bodensubstanz und Bodenlebewesen für eine nachhaltige und produktive Landwirtschaft herausgestellt. Eine Studie von TSCHARNTKE ET AL., 2012 hat ergeben, dass in einem Gramm Boden eines natürlichen Ökosystems etwa 1000 verschiedene Mikroorganismenarten zu finden waren, während in einem bewirtschafteten Boden nur etwa 140-150 Arten identifiziert werden konnten (BHATTACHARYYA ET AL., 2022: 6). Es stellt sich deshalb die Frage, von welchen Faktoren diese zentralen Komponenten der Bodengesundheit beeinflusst werden.

Abbildung 13: Abiotische und biotische Faktoren mit Einfluss auf das Bodenleben



Quelle: ISLAM ET AL., 2020: 3 (angepasst)

Abbildung 13 zeigt eine Übersicht, welche Faktoren das Mikrobiom des Bodens beeinflussen. Einige Faktoren wie beispielsweise die Bodenart oder das Sonnenlicht können nicht beeinflusst werden, woraus sich die Fokussierung auf die Managementmaßnahmen (rot eingerahmt) ergibt. Diese können von Landwirten entsprechend ihrer Zielsetzung angepasst werden und haben weitreichende Auswirkungen auf die anderen gezeigten Parameter, die das Bodenleben beeinflussen. So hat z.B. die Art der Bodenbearbeitung einen entscheidenden Einfluss auf die Feuchte und Temperatur des Bodens.

Da verschiedenen Studien nachgewiesen haben, dass die mikrobielle Biomasse eng mit dem C_{org} -Gehalt des Bodens zusammenhängt (BHATTACHARYYA ET AL., 2022: 2) und sich somit kein Zielkonflikt ergibt, soll im Folgenden untersucht werden, wie sich die folgenden Managementmaßnahmen auf das Bodenleben und die C_{org} -Gehalte des Bodens auswirken:

- Zwischenfruchtanbau (ZF-Anbau)
- Intercropping
- Direktsaat
- Biostimulanzien

Die untersuchten Maßnahmen wurden entsprechend der Empfehlungen von Beratern und Literatur Regenerativer Landwirtschaft abgeleitet.

5.1 Der Effekt von Zwischenfruchtanbau auf Bodenlebewesen

In den USA und Europa beträgt der Anteil der Ackerflächen auf denen Zwischenfrüchte (ZF) angebaut werden nur zwischen 1-10 % (POEPLAU U. DON, 2015: 4). Dabei muss allerdings beachtet werden, dass auf einem Teil dieser Flächen größtenteils Winterungen angebaut werden, die einen Anbau von ZF unnötig erscheinen lassen. Insgesamt wird geschätzt, dass durch Winterungen und ZF-Anbau in Afrika 41 %, in Amerika 47 %, in Asien 50 %, in Europa 56 % und in Ozeanien 42 % der Flächen über den Winter bedeckt sind (POEPLAU U. DON, 2015: 4). Durch eine zunehmende Implementierung von ZF in die Fruchtfolgen von Agrarbetrieben können die agronomischen und umweltbezogenen Probleme, die mit unbewachsenen temporären Brachen assoziiert sind, maßgeblich reduziert werden.

In Bezug auf das Bodenleben sollte das Ziel zum einen die Erhöhung der mikrobiellen Biomasse sein und zum anderen die Förderung der mikrobiellen Diversität, da verschiedene MO-Gruppen unterschiedliche Funktionen erfüllen und insgesamt zu einer größeren Resilienz des Mikrobioms beitragen (FINNEY ET AL., 2017: 1). Dabei ist anzumerken, dass es keine optimale Zusammensetzung gibt, die ein gesundes Bodenleben repräsentiert. Jedoch sind bestimmte MO-Gruppen besonders förderlich für die Bodengesundheit (FINNEY ET AL., 2017: 2). Dazu gehören z.B. AM.

Da Pflanzen die Hauptkohlenstoffquelle für das Bodenleben sind und dadurch maßgeblich dessen Wachstum und Aktivität beeinflussen, ist das Wissen wie sich ZF auf die mikrobielle Gesellschaft auswirken unabdingbar, um entsprechende Entscheidungen treffen zu können, die das Bodenleben fördern (FINNEY ET AL., 2017: 1).

Insgesamt können drei Mechanismen unterschieden werden, wie sich ZF auf MO auswirken:

1. *Wurzelexsudate ziehen bestimmte Mikroorganismen an*

Die organischen Verbindungen, die von den Pflanzenwurzeln ausgeschieden werden, sind äußerst divers und neben dem Alter und dem physiologischen Zustand hauptsächlich von der Pflanzenart abhängig. So fördern verschiedene Pflanzenarten unterschiedliche MO, deren Bandbreite AM, N-fixierende Bakterien, andere PGPR aber auch Pathogene umfasst. Der Effekt der Wurzelexsudate ist dabei hauptsächlich auf die Rhizosphäre begrenzt (VUKICEVICH ET AL., 2016: 3) (CASTLE ET AL., 2021: 2) (BALOTA ET AL., 2014: 9).

2. *Pflanzenstreu wirkt sich auf [saprophytische MO](#) aus*

Das zugeführte Pflanzenmaterial, bestehend aus oberirdischen Spross- und unterirdischen Wurzelteilen zum Ende der ZF-Periode beeinflusst insbesondere die saprophytischen Bodenlebewesen, also jene MO die organische Substanz zersetzen. Dabei spielt insbesondere die Zusammensetzung des Pflanzenmaterials eine bedeutende Rolle, die wiederum maßgeblich von der Pflanzenart und dem Pflanzenalter bestimmt wird. So werden durch leicht abbaubare Pflanzenrückstände mit engen C/N-Verhältnissen und geringen Ligningehalten überwiegend schnellwachsende Mikroben, inklusive krankheitsunterdrückenden Pseudomonas Bakterien gefördert, während MO wie Pilze und Acidobakterien insbesondere schwerer abbaubares Pflanzenmaterial mit weiteren C/N-Verhältnissen und höheren

Ligningehalten zersetzen (VUKICEVICH ET AL., 2016: 3) (BALOTA ET AL., 2014: 9). Insgesamt kann die Pathogenabwehr eines Bodens durch die Förderung einer diversen saprophytischen MO Gesellschaft und einer damit verbundenen zunehmende Konkurrenz um Ressourcen erhöht werden (VUKICEVICH ET AL., 2016: 3).

3. *Pflanzenbedeckung erhöht die Bodenfeuchte*

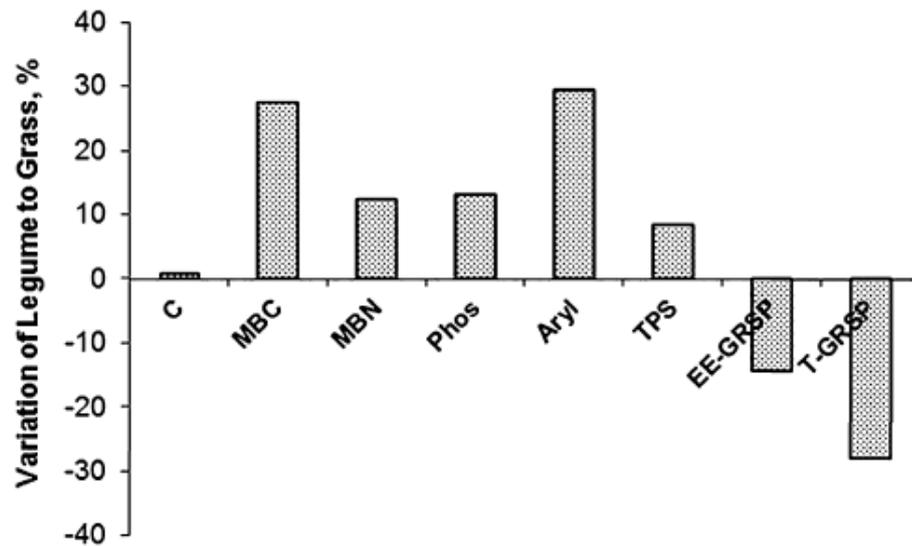
ZF erhöhen die Bodenfeuchte in der Regel zum einen während der Wachstumsphase, indem die Evaporation (Verdunstung von Wasser über unbewachsenen Landflächen) durch Beschattung verringert wird und zum anderen in Form einer Mulchschicht am Ende der ZF-Periode (Voraussetzung Direktsaat), wodurch die Solarstrahlung nur geschwächt zum Boden durchdringen kann. Mit dieser physischen Barriere wird einerseits die Bodenfeuchte erhöht und andererseits Bodentemperaturschwankungen effektiv reduziert. Das in der Folge veränderte Bodenfeuchte und -temperaturregime beeinflusst höchstwahrscheinlich das Vorkommen einzelner mikrobieller Gruppen (VUKICEVICH ET AL., 2016: 4) (SCAVO ET AL., 2022: 13) (FINNEY ET AL., 2017: 6) (NIVELLE ET AL., 2016: 2).

Mehrere Studien belegen, dass die Pflanzendiversität eng mit der mikrobiellen Diversität verbunden ist. Dies kann einerseits durch die pflanzenartspezifischen Wurzelexsudate erklärt werden und zum anderen durch die unterschiedlichen ökologischen Nischen, die durch verschiedene Pflanzen besetzt werden und damit auch entsprechend heterogenen Lebensraum für Bodenlebewesen schaffen (VUKICEVICH ET AL., 2016: 6). Demnach sollten insbesondere diversere ZF-Mischungen zum Anbau kommen (NIVELLE ET AL., 2016: 2) (CASTLE ET AL., 2021: 2). Folgende Pflanzenfamilien sind dabei besonders empfehlenswert:

Leguminosen

Leguminosen sind besonders interessant als Pflanzenart in einer ZF-Mischung auf Grund ihrer Fähigkeit durch die symbiontische Beziehung mit Knöllchenbakterien atmosphärischen Stickstoff zu fixieren und somit einen stark reduzierten Düngebedarf aufweisen. Zudem kann die Nachfrucht teilweise signifikante N-Mengen nutzen und getreideintensive Fruchtfolgen werden aufgelockert.

Abbildung 14: Variation (%) der mikrobiellen Parameter unter Leguminosen (Blaue Lupine + Zottige Wicke) verglichen mit Gräsern (Hafer + Winterweizen)



C: Organischer Kohlenstoff; MBC: Kohlenstoff in der mikrobiellen Biomasse; MBN: Stickstoff in der mikrobiellen Biomasse; Phos: [Phosphatase](#); Aryl: [Arylsulfatase](#); TPS: [Gesamten Polysaccharide](#); EE-GRSP: Einfach zu extrahierendes Glomalin; T-GRSP: Gesamt Glomalin

Quelle: BALOTA ET AL., 2014: 6

In Abbildung 14 sind die mikrobiellen Parameter eines Langzeitversuches über 23 Jahre in einer Sojabohnen – Mais Fruchtfolge unter Leguminosen ZF-Anbau gegenüber der ZF-Nutzung von grasartigen Pflanzen wie Hafer und Weizen dargestellt. MBC ist um ca. 28 % erhöht, MBN um 12 %, Phosphatase um 13 %, Arylsulfatase um 29 %, TPS um 8 % und EE-GRSP und T-GRSP um jeweils 15 und 28 % reduziert (BALOTA ET AL., 2014: 5). Die Leguminosen wirkten sich also auf alle mikrobiellen Parameter mit Ausnahme des Glomalingehaltes sehr positiv aus. Dieser Zusammenhang wird im hierauf folgenden C3/C4-Pflanzen Abschnitt ausführlicher behandelt. FINNEY ET AL. stellten in einer anderen Untersuchung zudem fest, dass die zottige Wicke als Leguminose insbesondere Nicht-AM Pilze fördert und zwar nicht nur als Reinkultur sondern auch als Komponente einer ZF-Mischung (FINNEY ET AL., 2017: 9).

C3/C4-Pflanzen

[C3 und C4 Pflanzen](#) gehören zu den Gräsern und unterscheiden sich hauptsächlich in ihrer Photosyntheseleistung in trockenen und warmen Regionen. So sind C4-Gräser, wie beispielsweise Mais oder Sorghum stark abhängig von der Symbiose mit AM, da sie natürlicherweise in ariden Gebieten mit hoher Lichtintensität vorkommen wo Wassereffizienz und P-Aufnahme kritische Faktoren sind (VUKICEVICH ET AL., 2016: 8). C3-Gräser, wie Hafer, Weizen und Gerste sind hingegen besser an kühlere Wetterlagen mit einer höheren Wasserverfügbarkeit angepasst (VLČEK U. POHANKA, 2020: 2). Diese Pflanzenarten profitieren zwar auch von einer Symbiose mit AM, sind jedoch auf Grund ihrer feineren Wurzelmorphologie nicht so stark abhängig davon wie C4-Gräser mit ihrem deutlich größerem Wurzelsystem.

Eine bemerkenswerte Verbindung konnte in mehreren Studien zwischen Hafer und Roggen und AM festgestellt werden. Zum einen erhöhten Hafer und Roggen sowohl als Reinkultur als auch als ZF-Komponente die Häufigkeit von AM, als auch die Dichte und Länge der Hyphen, die, wie bereits beschrieben, besonders bedeutsam für die Glomalinproduktion sind (FINNEY ET AL., 2017: 8). Dieser Zusammenhang spiegelt sich ebenso in Abbildung 14 wider. Der Gesamtglomalingehalt ist bei der Nutzung von Hafer und Weizen als ZF um 28 % erhöht gegenüber der Leguminosen ZF. Demnach wird vermutet, dass gräserartige ZF insbesondere AM fördern, während Bakterien hauptsächlich durch die N-anreichernde Wirkung von Leguminosen begünstigt werden (SCAVO ET AL., 2022: 13).

Brassicaceae

Zu der Pflanzenfamilie der Kreuzblütler (Brassicaceae) gehören Raps, Senf und Rettich als bekannte Nutzpflanzenvertreter (VLČEK U. POHANKA, 2020: 2). Diese Pflanzen sind nicht-mykorrhizal und gehen deshalb keine Symbiose mit AM ein. Zudem sorgen sie durch die Ausscheidung von anti-pilzlichen Substanzen für eine verminderte Sporenkeimung von AM (VUKICEVICH ET AL., 2016: 8). Zur Förderung dieser bedeutenden MO-Gruppe sind Brassicaceae deshalb ungeeignet. Außerdem wird vermutet, dass die Bodenlebewesen durch die Ausscheidung von schwefelhaltigen Glucosinolaten beeinflusst werden (FINNEY ET AL., 2017: 8). Diese Effekte sind allerdings noch relativ unerforscht.

Ein weiterer Aspekt, der bei der Zusammenstellung einer ZF beachtet werden muss, beinhaltet die Frage ob abfrierende oder winterharte ZF genutzt werden.

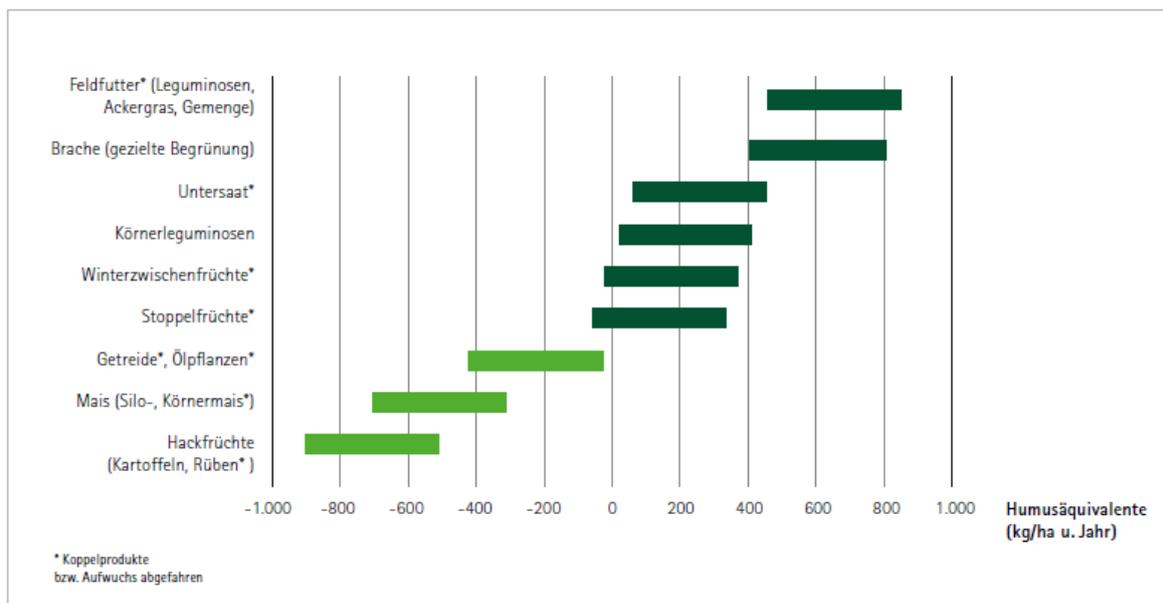
In einer Untersuchung haben FINNEY ET AL., 2017: 8 festgestellt, dass bei winterharten ZF im Frühjahr in der Regel eine höhere Abundanz wichtiger MO-Gruppen festgestellt werden konnte. Dieses Ergebnis wird darauf zurückgeführt, dass winterharte ZF sowohl im Herbst als auch im Frühjahr Ressourcen in Form von Wurzelexsudaten in den Boden eintragen während abfrierende ZF nach dem ersten stärkeren Frost absterben. Beachtet werden muss jedoch, dass das Management einer winterharten ZF gegenüber einer abfrierenden ZF eine größere Herausforderung darstellt. Insbesondere in Regionen in denen der Einsatz von Totalherbiziden immer stärker reglementiert wird.

5.2 Der Effekt von Zwischenfruchtanbau auf den Humusgehalt

ZF wirken sich einerseits in Form von zusätzlich zugeführtem Spross- und Wurzelmaterial, Wurzelexsudaten während der Wachstumsperiode und durch die Modifizierung von Umsatzbedingungen (Bsp. Bodenfeuchte und -temperatur) direkt auf die C_{org} -Gehalte des Bodens aus, während eine indirekte aber nicht zu vernachlässigende Wirkung durch die Verminderung von Wind- und Wassererosion und einem damit verbundenen reduzierten Abtrag von C_{org} -haltigem Oberboden und weiteren Nährstoffen auftritt. So konnte die Wassererosion auf einem Standort mit schluffigem Lehmboden im westlichen Kansas, USA durch den Anbau einer Winter Triticale ZF um 79 % gegenüber unbewachsenem Boden reduziert werden (SCAVO ET AL., 2022: 14).

Die Wirkung unterschiedlicher ZF auf die C_{org} -Gehalte des Bodens ergibt sich einerseits durch die Masse an zugeführtem ober- und unterirdischen Pflanzenmaterial und andererseits durch dessen Zusammensetzung. Hierbei kommt dem C/N-Verhältnis und dem Ligningehalt eine besondere Bedeutung zu. Grundsätzlich gilt: Je enger das C/N-Verhältnis und je geringer der Ligningehalt desto schneller und einfacher wird das organische Material von MO zersetzt. Während beispielsweise Lupine und Wicke ein C/N-Verhältnis von jeweils 16 und 13 haben, weisen Hafer und Weizen ein C/N-Verhältnis von jeweils 26 und 43 auf. Somit sind Gräser insgesamt durch ein weiteres C/N-Verhältnis gekennzeichnet und werden in der Folge langsamer zersetzt als Leguminosen (BALOTA ET AL., 2014: 8) (KOLBE ET AL., 2015: 15).

Abbildung 15: Bandbreite der Humifizierungskoeffizienten (HÄQ) der Fruchtarten



(Dunkelgrün = Humusmehrer; Hellgrün = Humuszehrer)

Quelle: KOLBE ET AL., 2015: 16

In Abbildung 15 ist die humifizierende Wirkung verschiedener Früchte dargestellt, die teilweise auch als ZF genutzt werden können. Der Humifizierungskoeffizient ist dabei als komplexe Summenwirkung zwischen Anbaudauer, Bodenruhe, Menge und C/N-Verhältnis des ober- und unterirdischen Pflanzenmaterials in Abhängigkeit von den Eigenschaften des Standortes (Boden, Klima) zu verstehen (KOLBE ET AL., 2015: 14 ff.). Kulturen, die zum Humusaufbau beitragen, werden als „Humusmehrer“ bezeichnet und haben einen positiven Koeffizienten während Fruchtarten, bei denen die eingebrachten Pflanzenmaterialmengen nicht ausreichen, um den natürlich stattfindenden Humusabbau zu kompensieren als „Humuszehrer“ bezeichnet werden (KOLBE ET AL., 2015:15).

Aus Abbildung 15 kann zum einen abgeleitet werden, dass Anbausysteme mit möglichst geringer Eingriffsintensität in den Boden vorteilhaft für den C_{org} -Aufbau sind (z.B. mehrjähriger Feldfutterbau), da Mineralisationsreize durch ausbleibende Bodenbearbeitung reduziert werden und zum anderen stellt es die Bedeutung von Ernte- und Wurzelrückständen heraus. Diese sollten auf der Ackerfläche verbleiben, da ansonsten ein Großteil der Fruchtfolgen hauptsächlich aus humuszehrenden Fruchtarten bestehen würde, was mittel- und langfristig zur Bodendegradation führt.

In Bezug auf diesen Zusammenhang haben NIVELLE ET AL., 2016: 6 eine interessante Untersuchung in einer Winterweizen, Erbsen, Mais und Lein Fruchtfolge durchgeführt. Bei diesem 5-jährigen Versuch wurden nur die Ernterückstände des Weizens auf der Fläche belassen. Trotz der geringen Zuführung an organischem Material durch die Hauptfrüchte konnte einem Humusabbau durch die Integration einer Winter ZF-Mischung bestehend aus Hafer, Phacelia, Flachs, Wicken, Ackerbohne und Klee erfolgreich entgegengewirkt werden. Dies unterstreicht die Bedeutung des ZF-Anbaus insbesondere für Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil humuszehrender Fruchtarten.

Neben den zahlreichen unbestreitbaren Vorteilen von ZF, wie beispielsweise die Verminderung von Erosionsereignissen, reduzierte Nitratauswaschung und die unkrautunterdrückende Wirkung etc. bringt der ZF-Anbau auch Herausforderungen mit sich (SCHMIDT ET AL., 2018: 2). Insbesondere in ariden Anbaugebieten in denen Wasser der begrenzende Wachstumsfaktor ist, stellt das Wassermanagement eine echte Herausforderung dar. So wurde der Weizenertrag auf einem Standort mit nur etwa 428 mm jährlichem Niederschlag nach Anbau einer ZF Leguminose um etwa 33 % verringert (SCAVO ET AL., 2022: 8). Einerseits haben ZF durch Beschattung und der damit verbundenen reduzierten Evaporation einen positiven Effekt auf den Bodenwasserhaushalt, andererseits verbrauchen ZF Wasser während der Wachstumsphase durch Transpiration und abhängig von der Managementmaßnahme auch bei der Etablierung und Termination (Bsp. Intensive BB vs. Direktsaat). Demnach ist es besonders wichtig durch eine standortangepasste ZF-Etablierung und Termination, sowie ZF-Wahl die negativen Effekte von ZF auf den Wasserhaushalt zu reduzieren und somit letztlich das pflanzenverfügbare Wasser durch den ZF-Anbau zu erhöhen.

Fazit ZF

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass der ZF-Anbau zum einen das Vorkommen und die Aktivität von Bodenlebewesen fördert und zum anderen auch einen bedeutenden Beitrag zum Aufbau von C_{org} leistet. So konnte in einer von POEPLAU U. DON, 2015: 5 durchgeführten Metastudie festgestellt werden, dass der Anbau von ZF im Mittel zu einer jährlichen C-Sequestrierung von 0,32 Tonnen/ha/Jahr führt. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass eine ansonsten temporäre Brache durch eine zusätzliche Periode der C-Assimilation ersetzt wird (POEPLAU U. DON, 2015: 6).

Ein Schlüsselaspekt scheint die Diversifizierung des Bodenmikrobioms zu sein, die durch eine entsprechende Pflanzendiversität erreicht wird, da bestimmte Pflanzen spezielle MO-Gruppen fördern (CASTLE ET AL., 2021: 2). Trotzdem konstatieren mehrere Autoren, dass wir hier erst am Anfang stehen und noch viel intensiver erforscht werden muss, welche Verbindungen zwischen einzelnen Pflanzenarten und MO bestehen und welche Prozesse dahinterstehen. Wenn diese Zusammenhänge ausführlich erforscht wurden, können Landwirte durch die Wahl der richtigen ZF und Anpassung der Fruchtfolge gezielt auf das Bodenleben einwirken (FINNEY ET AL., 2017: 10).

5.3 Intercropping als Maßnahme zur Erhöhung der Pflanzendiversität

Eine interessante Form der Landbewirtschaftung, um eine gewisse Pflanzendiversität zu gewährleisten ist das sogenannte „Intercropping“. Dabei wachsen zwei oder mehr Kulturen zur gleichen Zeit auf derselben Fläche, wobei mindestens eine Kultur letztlich als Marktfrucht geerntet wird (DUCHENE ET AL., 2017: 2) (CUARTERO ET AL., 2022: 1). Dabei wird die gewöhnliche Fruchtfolge aufgelockert, ohne dabei auf den Anbau wirtschaftlich wichtiger Hauptkulturen zu verzichten. Weitere Vorteile ergeben sich durch eine verbesserte Ressourcennutzung, eine unkraut- und schädlingsunterdrückende Wirkung sowie dem Eintrag von Nährstoffen (DUCHENE ET AL., 2017: 2).

Leguminosen gelten als wichtigste Begleitpflanzen für gräserbasierte Fruchtfolgen, wie sie in bedeutenden Ackerbauregionen zu finden sind. Einerseits auf Grund der Tatsache, dass sich Leguminosen in natürlichen Ökosystemen häufig in der Nähe von Gräsern ansiedeln und deshalb vermutet wird, dass sie auch in Agrarökosystemen eine gut geeignete Begleitkultur darstellen und andererseits wegen ihrer Fähigkeit atmosphärischen Stickstoff zu fixieren. Es wird vermutet, dass durch diese zusätzliche N-Quelle die interspezifische Konkurrenz um die N-Aufnahme zwischen den Hauptkulturen und den Leguminosen Begleitpflanzen reduziert wird und zum anderen können der Nachfrucht durch den Umsatz des abgestorbenen Leguminosenmaterials signifikante N-Mengen (zwischen 40–100 kg N/ha) zur Verfügung gestellt werden (DUCHENE ET AL., 2017: 3).

Eine interessante Entdeckung machte Jensen 1996 als er die fixierte N-Menge von Erbsen in einem Intercroppingsystem mit Gerste der fixierten N-Menge von Erbsen als Reinkultur gegenüberstellte: Die fixierte N-Menge im Intercroppingsystem war mit 17,7 g N pro m²

mehr als dreifach so hoch als bei der Reinkultur Erbsen mit nur 5,1 g N pro m² (DUCHENE ET AL., 2017: 3). Der beobachtete Effekt ist darauf zurückzuführen, dass auch Leguminosen N präferiert in mineralischer Form aufnehmen (Nitrat + Ammonium). Nur wenn das Nmin-Angebot insgesamt limitiert ist oder es zur Konkurrenz um Nmin mit anderen Pflanzen kommt, werden signifikante Mengen atmosphärischer N fixiert. Dementsprechend kann Intercropping dazu beitragen, das N-Fixierungspotential von Leguminosen vollständig auszunutzen, da die N-Fixierungsrate negativ mit dem Nmin-Gehalt des Bodens korreliert ist (DUCHENE ET AL., 2017: 4). So eignen sich Pflanzen mit großem N-Bedarf, die den vorhandenen Nmin weitestgehend aufnehmen (z.B. Winterraps), sehr gut als Hauptkultur für Leguminosenintercropping.

Wie auch bei diverseren ZF-Mischungen scheint die Diversifizierung durch den Anbau mehrerer Pflanzenarten gleichzeitig die mikrobielle Diversität gegenüber einer Reinkultur zu fördern. Dies kann einerseits durch eine insgesamt höhere Produktivität pro Flächeneinheit erklärt werden, wodurch insgesamt mehr und diversere C- und N-haltige Verbindungen in den Boden gelangen, die wiederum als Substrat für unterschiedliche MO dienen und andererseits durch die Absonderung spezieller Stoffe, wie z.B. sekundäre Pflanzenstoffe durch Leguminosen (DUCHENE ET AL., 2017: 8). So kommt dem Flavonoid Naringenin beispielsweise eine besondere Bedeutung bei dem Aufbau einer symbiontischen Beziehung mit Rhizobium Bakterien zu (DUCHENE ET AL., 2017: 6).

Fazit Intercropping

Insgesamt basiert der Erfolg eines Intercroppingsystems auf der Ausnutzung unterschiedlicher Ressourcenpools durch verschiedene Pflanzenarten. Trotz alledem kann diese positive Komplementarität unter bestimmten Umständen schnell in direkte Ressourcenkonkurrenz zwischen den Pflanzenarten umschlagen. So stehen beispielsweise Leguminosen trotz ihrer Fähigkeit atmosphärischen N zu fixieren bei zu hohen Nmin-Gehalten im Boden in direkter Konkurrenz zu einer möglichen grasartigen Hauptkultur wie Weizen. Für das Intercropping eignen sich deshalb Kulturen, die nicht in direkter Konkurrenz um knappe Ressourcen wie Raum, Nährstoffe, Wasser oder Sonnenlicht stehen. Erfolgsversprechende Intercropping Systeme, welche teilweise auch schon praxiserprobt sind, bestehen aus Winterraps als Hauptkultur mit Ackerbohne als Begleitfrucht oder Winterweizen mit einer zeitlich versetzten Kleeuntersaat, um den Einsatz von mineralischen N-Düngern bei der Nachfrucht reduzieren zu können.

5.4 Direktsaateneffekte auf Bodenlebewesen

Die Bearbeitung des Bodens hat sich vor langer Zeit als eine Standardmaßnahme in der Landwirtschaft etabliert. Vorteile, die mit dieser intensiven Maßnahme verbunden werden, sind: Bodenlockerung- und belüftung, Einmischen von Ernte – und Wurzelrückständen und eine damit verbundene Erleichterung der Aussaat sowie mechanische Unkrautbekämpfung. Auf der anderen Seite sind bedeutende Bodendegradierungsprozesse wie beispielsweise Bodenschadverdichtungen, Wasser- und Winderosion und Nitratauswaschung eng mit dem Prozess der Bodenbearbeitung verknüpft (HADDAWAY ET AL., 2017: 2).

Ein besonderes Anbausystem, welches insbesondere in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen hat, ist die Direktsaat. Dabei wird die Kultur ohne jegliche Bodenbearbeitung (BB) direkt in die organischen Rückstände der Vorfrucht ausgesät. Dadurch können Degradierungsprozesse, die mit BB assoziiert sind, weitgehend vermindert werden. Aktuell wird Direktsaat nur auf 1,1 % der Ackerflächen in Europa, 11% in Australien, 28 % in Nordamerika und 47 % in Südamerika praktiziert (BALOTA ET AL., 2014: 1) (MARTÍNEZ ET AL., 2016: 2). Im Folgenden Abschnitt soll untersucht werden, wie sich diese Form der Landwirtschaft auf das Bodenleben und die C_{org} -Gehalte des Bodens auswirkt.

Insgesamt kann eine starke Stratifizierung der mikrobiellen Biomasse unter Direktsaat (NT) festgestellt werden. Das heißt die obere Bodenschicht (0-5 cm) weist signifikant höhere MO-Parameter auf, gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung (CT). Dieser Effekt kann zum Teil in Bodentiefen bis 10-15 cm beobachtet werden (BALOTA ET AL., 2014: 4) (SCHMIDT ET AL., 2018: 6) (RODGERS ET AL., 2021: 3 ff.). In darunter liegenden Bodentiefen ist die MO-Abundanz in CT-Systemen in der Regel höher, wobei die mikrobielle Biomasse über das Bodenprofil bis zur maximalen Arbeitstiefe relativ homogen verteilt ist (SCHMIDT ET AL., 2018: 6). Neben einem erhöhten Vorkommen von MO in der oberen Bodenschicht, konnte unter Direktsaat auch eine signifikante Zunahme der Enzymaktivität von wichtigen Enzymen, wie beispielsweise Phosphatase festgestellt werden, welchem eine bedeutende Rolle bei der Lösung von fixiertem Phosphat zukommt.

So konnten BALOTA ET AL., 2014: 5 in 0-5 cm Bodentiefe unter Direktsaat eine 99 % höhere Phosphataseaktivität gegenüber CT feststellen. Dieser Zusammenhang kann entweder auf eine erhöhte Enzymproduktion pro MO-Einheit oder auf die insgesamt höhere mikrobielle Biomasse zurückgeführt werden (SIBLE, 2022: 32).

Es wird vermutet, dass die beobachteten Effekte der Stratifizierung von MO unter Direktsaat auf veränderte bodenphysikalische Parameter zurückgeführt werden können, die auf Grund der ausbleibenden BB hauptsächlich in der oberen Bodenschicht (0-15 cm) beobachtet werden können. Dazu zählen z.B. verminderte Bodentemperaturschwankungen, eine höhere Bodenfeuchte, ein höherer Anteil Makroaggregate und ein höherer C_{org}-Gehalt, der als Hauptenergiequelle für die Bodenlebewesen dient (SCHMIDT ET AL., 2018: 10).

Mutmaßlich ist die Biodiversität des Bodenlebens eng mit der Diversität von verfügbaren Mikrohabitaten verknüpft ist. Da BB, je nach Intensität, insgesamt eher zu einer Homogenisierung von bodenphysikalischen und -chemischen Parametern über den bearbeiteten Horizont führt (z.B. Nährstoffverfügbarkeit), kann davon ausgegangen werden, dass dadurch auch das Vorkommen von Mikrohabitaten erheblich reduziert wird (SCHMIDT ET AL., 2018: 12). Demgegenüber werden MO unter Direktsaat in Folge der Stratifizierung unterschiedliche Lebensräume geboten, die vermutlich zu einem diverseren Bodenleben beitragen (MATHEW ET AL., 2012: 1).

AM, als eine besonders wichtige MO-Gruppe für die Bodengesundheit, werden besonders negativ beeinflusst durch BB. Untersuchungen von BHATTACHARYYA ET AL., 2022: 7 und WORTMANN ET AL., 2008: 6 haben ergeben, dass das Vorkommen von AM um ca. 40-60% durch konventionelle BB gegenüber Direktsaat reduziert wird. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass ausgebildete Hyphen, die besonders wichtig sind für die Nährstoffversorgung, durchtrennt werden und damit das Hyphen Netzwerk unterbrochen wird (MBUTHIA ET AL., 2015: 8) (WORTMANN ET AL., 2008: 6) (FRAC ET AL., 2018: 4). Zudem kommt es durch die ständige mechanische Störung, insbesondere im Zuge wiederholter BB, zu einer verminderten Wurzel- und Bodenbesiedlung sowie einer Selektion von Arten, die zwar effizient Sporen verteilen aber weniger Ressourcen in die Bildung von Hyphen investieren (VUKICEVICH ET AL., 2016: 9). Darüber hinaus fördert Direktsaat durch ein feuchteres Bodenmikroklima und geringere Bodentemperaturextrema das pilzliche Wachstum (DETHERIDGE ET AL., 2016: 9).

Tabelle 2: Einfach zu extrahierendes Glomalin (EE-GRSP) und Gesamt Glomalin (T-GRSP) in unterschiedlichen Bodentiefen nach 23 Jahren Winterkulturen in Direktsaat (NT) und konventioneller BB mit Pflug (CT)

| Winter crop | EE-GRSP | | T-GRSP | |
|-----------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| | CT | NT | CT | NT |
| 0–5 cm | | | | |
| Fallow | 0.60 c B | 0.87 c A | 2.45 bc B | 3.38 b A |
| Oat | 0.96 a B | 1.25 ab A | 3.11 abc B | 4.64 a A |
| Wheat | 0.94 a B | 1.17 abc A | 3.55 a B | 5.07 a A |
| Radish | 0.67 bc B | 0.86 c A | 2.28 c B | 3.16 b A |
| Lupin | 0.70 bc B | 0.95 bc A | 2.54 bc B | 3.22 b A |
| Vetch | 0.82 ab B | 1.33 a A | 3.24 ab B | 4.61 a A |
| Mean | 0.78 B | 1.07 A | 2.86 B | 4.01A |
| 5–10 cm | | | | |
| Fallow | 0.52 b A | 0.60 c A | 2.15 a A | 3.00 ab A |
| Oat | 0.86 a B | 1.10 a A | 2.97 a A | 3.97 a A |
| Wheat | 0.88 a A | 0.98 ab A | 3.11 a A | 3.46 ab A |
| Radish | 0.62 ab A | 0.72 bc A | 2.20 a A | 2.64 ab A |
| Lupin | 0.62ab A | 0.78abc A | 2.11 a A | 2.20 b A |
| Vetch | 0.74 ab B | 1.08 a A | 2.74 a A | 3.50 ab A |
| Mean | 0.71 B | 0.88A | 2.55 B | 3.13A |
| 10–20 cm | | | | |
| Fallow | 0.50 c A | 0.41 c A | 2.55 a A | 2.21 ab A |
| Oat | 0.81 a A | 0.83 a A | 3.45 a A | 3.33 a A |
| Wheat | 0.77 ab A | 0.82 a A | 2.94 a A | 3.08 ab A |
| Radish | 0.52 bc A | 0.61 abc A | 2.40 a A | 1.97 ab A |
| Lupin | 0.60 abc A | 0.53 bc A | 2.11 a A | 1.78 b A |
| Vetch | 0.75 abc A | 0.76 ab A | 3.10 a A | 3.01 ab A |
| Mean | 0.66A | 0.66A | 2.76A | 2.56A |

Werte innerhalb einer Spalte und Bodentiefe mit unterschiedlichen Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant ($p \leq 0.05$). Werte innerhalb einer Zeile mit unterschiedlichen Großbuchstaben unterscheiden sich signifikant ($p \leq 0.05$).

Quelle: BALOTA ET AL., 2014: 5 (angepasst)

Mit der ausbleibenden BB unter Direktsaat und dem damit verbunden positiven Effekt auf AM ist auch die positive Auswirkung auf die Glomalingehalte in der oberen Bodenschicht zu begründen (BALOTA ET AL., 2014: 4). So zeigt Tabelle 2, dass signifikante Unterschiede zwischen konventioneller BB mit Pflug gegenüber Direktsaat in Bezug auf den Gesamt Glomalingehalt bis 10 cm Bodentiefe festzustellen sind. VLČEK U. POHANKA, 2020: 3 merken in diesem Zusammenhang an, dass eine positive Korrelation zwischen Direktsaat und dem Glomalingehalt in der oberen Bodenschicht besteht, was insbesondere auf die

bereits dargestellte Stratifizierung von Nährstoffen und organischen Materialien und dem damit einhergehenden stratifizierten Vorkommen von z.B. AM zurückgeführt werden kann.

Eine weitere bedeutende Gruppe von Bodenlebewesen, die von der Intensität der BB maßgeblich beeinträchtigt wird, sind Regenwürmer. Die BB-Intensität, die eine Kombination aus Arbeitstiefe, Fragmentierungsgrad und Häufigkeit darstellt, beeinflusst maßgeblich die Populationsgröße und -diversität von Regenwürmern. Insgesamt werden Regenwurmpopulationen hauptsächlich durch die mechanische Beschädigung in Folge des physischen Kontaktes mit BB-Werkzeugen oder in Bewegung versetzten Bodenaggregaten beeinträchtigt (BERTRAND ET AL., 2015: 7). Insbesondere aktiv angetriebene rotierende Geräte, wie beispielsweise Kreiseleggen, führen zu einem hohen Fragmentierungsgrad und damit in besonderem Maße zu dem beschriebenen Effekt. So wird geschätzt, dass zwischen 61-68 % der Regenwurmbiomasse im Bearbeitungshorizont einer Kreiselegge getötet wird (BERTRAND ET AL., 2015: 8). Darüber hinaus führt wendende BB durch die plötzliche Freilegung einer tieferen Bodenschicht zu einem erhöhten Regenwurmverlust durch Jäger und Austrocknung (BERTRAND ET AL., 2015: 8). CHAN, 2001 hat in diesem Zusammenhang festgestellt, dass 5-jähriger Pflugeinsatz in seiner Untersuchung die Regenwurmbiomasse um 70 % und die Regenwurmanzahl um 80 % reduzierte (BERTRAND ET AL., 2015: 8). PELOSI ET AL., 2009 konnten in einem Direktsaatsystem eine drei bis sieben Mal höhere Anzahl an anektischen und epigäischen Regenwürmern feststellen als in einem System mit wendender BB (BERTRAND ET AL., 2015: 8).

Eine weitere interessante Beobachtung ist, dass die drei verschiedenen Regenwurmartentypen unterschiedlich stark von BB beeinträchtigt werden. Während epigäische Regenwurmartentypen hauptsächlich durch den Wegfall ihrer primären Nahrungsquelle in Folge des Einarbeitens des Auflagemulches reduziert werden, werden anektische Regenwurmartentypen auf Grund ihrer Größe hauptsächlich durch mechanische Beschädigung beeinträchtigt und gehören insgesamt zu den am stärksten betroffenen Regenwurmpopulationen. Endogäische Regenwurmartentypen hingegen werden weniger beeinträchtigt und scheinen durch den Einsatz des Pfluges zum Teil sogar gefördert zu werden, da ihr Zugang zu organischem Material durch die Einarbeitung erleichtert wird. So wird geschätzt, dass endogäische Regenwurmartentypen auf gepflügten Flächen ca. 75 % der Regenwurmpopulationen ausmachen, während es bei ausbleibender BB nur ungefähr 36 % sind (BERTRAND ET AL., 2015: 8).

Insgesamt sollten Landwirte, die trotz BB regenwurm-freundlich arbeiten wollen, folgende Dinge beachten:

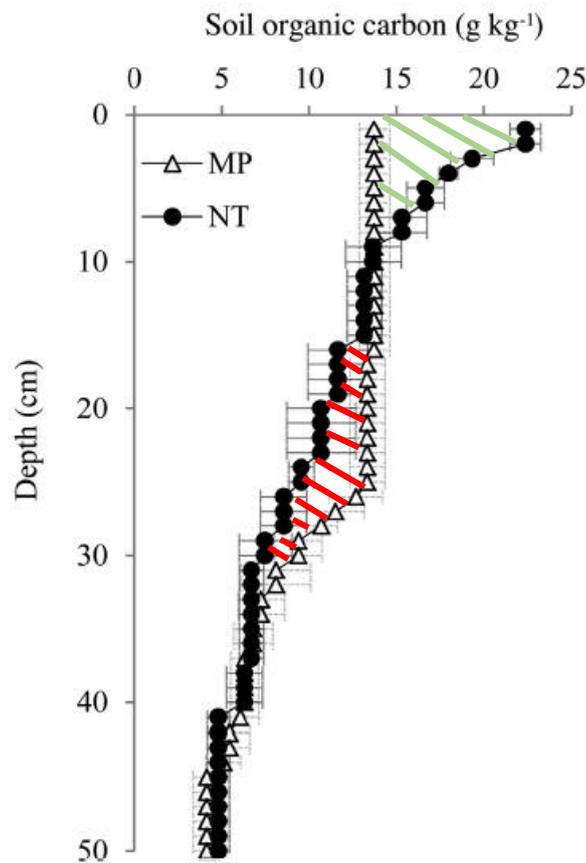
- Minimal-BB-System mit passiv arbeitenden Werkzeugen aktiven Werkzeugen vorziehen
- BB im Winter vorteilhafter gegenüber Frühjahr, da adulte Regenwürmer weniger sensitiv auf mechanische Störung reagieren
- Nicht-wendende BB konventioneller BB mit Pflug vorziehen

Trotz dieser Ansätze die Beeinträchtigung der Regenwurmpopulation in Folge von BB zu vermindern, ist ausbleibende BB (Direktsaat) das regenwurm-freundlichste Anbausystem (BERTRAND ET AL., 2015: 8).

5.5 Direktsaateneffekte auf den Humusgehalt

Während ZF-Anbau auf eine aktive Erhöhung der C_{org} -Gehalte durch das Zuführen von zusätzlichem Kohlenstoff (Pflanzenmaterial + Wurzelexsudate) abzielt, ist das primäre Ziel von ausbleibender BB die Mineralisierung des im Boden befindlichen C_{org} zu reduzieren. In diesem Zusammenhang konstatieren SHEEHY ET AL., 2015: 2 und LAL ET AL., 2015: 2, dass BB durch das Zerstören von Bodenaggregaten, dem Einarbeiten von organischem Material und dem mit der BB verbundenen Sauerstoffeintrag dazu führen kann, dass passive C_{org} -Pools mit einer langfristigen Verweilzeit im Boden in aktive C_{org} -Pools umgewandelt werden, die innerhalb weniger Wochen umgesetzt werden. Wie auch bei dem Effekt auf die MO kommt es unter Direktsaat zu einer ausgeprägten Stratifizierung der C_{org} -Gehalte.

Abbildung 16: Einfluss des Bodenbearbeitungssystems auf die C_{org} -Gehalte in unterschiedlicher Bodentiefe



MP = Pflug, NT = Direktsaat

Quelle: MARTÍNEZ ET AL., 2016: 7 (angepasst)

In Abbildung 16 ist sehr gut zu sehen, dass die C_{org} -Gehalte bei wendender BB relativ homogen bis hin zur maximalen Arbeitstiefe verteilt sind (in diesem Fall ca. 28 cm), während es unter Direktsaat zu einer Akkumulation von organischem Material nahe der Bodenoberfläche kommt. Ob Direktsaat letztlich zu einer Erhöhung der C_{org} -Gehalte führt, hängt letztendlich davon ab, ob die grün straffierte Fläche größer ist als die rot straffierte Fläche und somit die Zunahme der C_{org} -Gehalte in der oberen Bodenschicht die Abnahme der C_{org} -Gehalte in tieferen Bodenschichten kompensieren kann.

Signifikant positive Effekte auf die C_{org} -Gehalte beschränken sich im Wesentlichen auf Bodentiefen bis 10-15 cm, während darunter eher geringere C_{org} -Gehalte zu beobachten sind als unter konventioneller BB (BAKER ET AL., 2006: 3) (GUENET ET AL., 2020: 6) (HADDAWAY ET AL., 2017: 28).

Dieser Zusammenhang ist darauf zurückzuführen, dass es bei konventioneller BB zu einem mechanischen Einmischen des Pflanzenmaterials in tiefere Bodenschichten kommt. Wenn das gesamte Bodenprofil betrachtet wird, sind häufig keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf die C_{org} -Gehalte zu beobachten (HADDAWAY ET AL., 2017: 28) (MARTÍNEZ ET AL., 2016: 5).

MARTÍNEZ ET AL., 2016: 2 stellen fest, dass unterschiedliche Ergebnisse wie sich Direktsaat auf die C_{org} -Gehalte des Bodens auswirken, maßgeblich mit dem untersuchten Bodenhorizont zusammenhängen. Während Untersuchungen bis maximal 20 cm häufig zu einem äußerst positiven Ergebnis kommen, wird in Studien, die das gesamte Bodenprofil untersuchen kein Effekt festgestellt. LAL ET AL., 2015: 2 betonen jedoch, dass es bei der Bodenbeprobung besonders wichtig ist auch den Bodenhorizont tiefer als 30 cm miteinzubeziehen, da 50 % des C_{org} bis zu 1 m Tiefe in der Bodenschicht 30 cm bis 1 m Tiefe gespeichert ist.

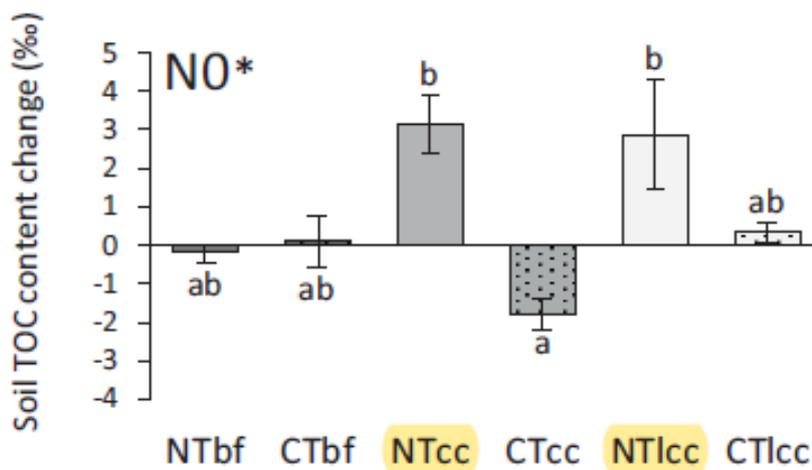
Fazit Direktsaat und C_{org}

Insgesamt ist der Nettoeffekt der Direktsaat auf die C-Sequestrierung nicht eindeutig, da dieser stark abhängig von dem betrachteten Bodenhorizont ist. Klar ist jedoch, dass es unter Direktsaat zu einer signifikanten Akkumulation von organischem Material an der Bodenoberfläche kommt, die einige ökologische und pflanzenbauliche Vorteile bietet. So fungiert die Mulchschicht als Erosionsschutz, was insbesondere in Anbetracht zunehmender Extremwetterereignisse von besonderer Bedeutung ist. Darüber hinaus werden Bodentemperaturschwankungen und das Auftreten von extrem hohen Bodentemperaturen maßgeblich vermindert. Zudem kommt es zu einem positiven Effekt auf den Wasserhaushalt durch die Entwicklung eines natürlichen Bodengefüges inklusive Bodenlebens. Dadurch können hohe Wassermassen schneller infiltrieren und Wasserverluste werden durch die Verminderung der Evaporation reduziert. Nicht zuletzt bietet Direktsaat dem Landwirt auch ökonomische Vorteile, da der Energiebedarf dieses Anbausystems durch die ausbleibende BB maßgeblich reduziert werden kann.

Kombination ZF-Anbau und Direktsaat

SCHMIDT ET AL., 2018: 3 stellen zusammenfassend fest, dass eine Kombination aus ZF-Anbau und Direktsaat das größtmögliche Potenzial bietet, um zentrale Parameter der Bodengesundheit, wie den C_{org} -Gehalt oder das Vorkommen und die Diversität von Bodenlebewesen zu fördern.

Abbildung 17: Veränderungen des C_{org} -Gehaltes nach 5 Jahren unterschiedlicher BB + ZF-Anbau



Säulen mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant ($p \leq 0.05$)

TOC = Total organic carbon (C_{org}); NTbf = Direktsaat + ohne ZF; CTbf = Pflug + ohne ZF; NTcc = Direktsaat + Standard ZF-Mischung; CTcc = Pflug + Standard ZF-Mischung; NTlcc = Direktsaat + Standard ZF-Mischung mit höherem Leguminosenanteil; CTlcc = Pflug + Standard ZF-Mischung mit höherem Leguminosenanteil; N0 = Ohne mineralische N-Düngung

Quelle: NIVELLE ET AL., 2016: 4 (angepasst)

Diese Aussage wird durch Abbildung 17 unterstrichen. Bei diesem 5-jährigen Feldversuch der im Norden Frankreichs in einer Weizen – Erbsen – Körnermais – Weizen – Flachs Fruchtfolge durchgeführt wurde, zeigte sich die besondere Bedeutung der Kombination von ZF-Anbau und Direktsaat, in diesem Fall in Bezug auf die relative Veränderung der C_{org} -Gehalte des Bodens. Die ZF-Mischungen „cc“ und „lcc“ bestanden aus Hafer, Phacelia, Flachs und Leguminosen wie Wicke, Ackerbohne und ägyptischem Klee, wobei die „lcc“ Mischung durch eine höhere Aussaatstärke der Leguminosenarten charakterisiert war.

Insgesamt kann dieser kombinierte Effekt von ZF-Anbau und Direktsaat auf Faktoren wie gemäßigte Bodentemperaturen, ausbleibende Sauerstoffeinträge, höhere Bodenfeuchte, ein verbessertes Bodengefüge und zusätzliche Einträge von organischem Material zurückgeführt werden (BALOTA ET AL., 2014: 8).

5.6 Der Einsatz von Biostimulanzien

Als Biostimulanzien werden Substanzen oder Organismen unterschiedlichster Herkunft bezeichnet, die sich auf verschiedenste Art und Weise positiv auf Boden und Pflanzen auswirken sollen. Es gibt nicht in allen Ländern eine gültige Definition des Begriffs „Biostimulanzien“ aber beschrieben werden können diese Stoffe als „Substanzen oder Mikroorganismen, die bei der Applikation zur Saat, zur Pflanze oder zur Rhizosphäre natürliche Prozesse stimulieren um die Nährstoffaufnahme, die Nährstoffeffizienz, die Toleranz gegenüber abiotischem Stress oder Erträge und Qualitäten zu verbessern“ (SIBLE, 2022: 8).

Zu den wichtigsten Biostimulanzien gehören Humin- und Fulvosäuren, N-fixierende Bakterien, P-lösende MO sowie AM. Bei Humin- und Fulvosäuren handelt es sich um stabile chemische Verbindungen, die am Ende des Zersetzungsprozesses von organischer Substanz überbleiben. Diese Substanzen können aus verschiedensten Quellen gewonnen werden: Beispielsweise aus kompostiertem organischem Material oder Torfböden, wobei die Herkunft über die genaue Struktur, Zusammensetzung und Wirkung der Stoffe entscheidet. So wurde beispielsweise festgestellt, dass insbesondere Substanzen, die aus Kompost gewonnen werden, einen besonders hohen C-Gehalt aufweisen, der dann als Energiequelle für das Bodenleben fungiert und einen direkten Einfluss auf die Produktivität des Bodens haben kann (SIBLE, 2022: 13 ff.).

Eine Möglichkeit die Zufuhr von mineralischen Düngemitteln zu reduzieren könnte die Ausbringung von N-fixierenden Bakterien sein. Dabei können entweder Rhizobien genutzt werden, die in einer Symbiose mit Leguminosen leben und deshalb auch auf diese Pflanzenart angewiesen sind oder aber freilebende N-fixierende Bakterien, wie z.B. Azospirillum, Azotobacter, Pseudomonas, oder Burkholderia. Für eine erfolgreiche Etablierung sollten die N-fixierenden Bakterien entweder in den Wurzelraum der wachsenden Pflanzen appliziert werden oder direkt als Saatgutbehandlung (Impfung).

Am weitesten verbreitet ist in diesem Zusammenhang die Nutzung von *Azospirillum brasilense* als freilebendes Bakterium und *Bradyrhizobium japonicum* zur Impfung von Leguminosen (SIBLE, 2022: 17 ff.).

Wie bereits erwähnt, können bis zu 90 % des applizierten Phosphors fixiert sein und dadurch die Pflanzenverfügbarkeit stark abnehmen. Einige MO sind in der Lage verschiedene Phosphorverbindungen durch die Absonderung von organischen Säuren und Enzymen zu lösen. Der kommerzielle Einsatz von Bakterienstämmen wie *Pseudomonas*, *Burkholderia* und *Enterobacter* oder Pilzarten wie *Aspergillus* und *Penicillium* hat erst kürzlich begonnen, so dass erste Ergebnisse über Anwendung und Nutzen noch ausstehen (ABRAHAM ET AL., 2022: 1) (SIBLE, 2022: 21 ff.) (BANO ET AL., 2021: 8).

In einer Gewächshausstudie konnte bei der Saatgutbehandlung von Mais mit dem AM-Pilz *Penicillium bilaiae* eine verbesserte P-Aufnahme und ein insgesamt verbessertes Pflanzenwachstum festgestellt werden. Allerdings nur bei einer ausreichenden Nährstoffversorgung, insbesondere mit N. Da auch der AM-Pilz Nährstoffe benötigt, zeigt dies die Bedeutung einer ausreichenden Nährstoffversorgung bei einer Saatgutbehandlung (Impfung) mit AM-Pilzen, da es im Falle eines Nährstoffmangels sogar zu einer Konkurrenzsituation mit der Pflanze kommen kann (SIBLE, 2022: 24 ff.). Trotz dessen konnte in einer Gewächshausstudie mit Tomaten unter kontrollierten Bedingungen ein signifikant positiver Effekt der Impfung des Saatgutes mit PGPR und AM festgestellt werden. So konnte die mineralische Düngung der geimpften Pflanzen bei gleichem Ertrag um 75 % reduziert werden verglichen mit der ungeimpften Variante und voller Düngermenge (CHAPARRO ET AL., 2012: 4). Dennoch muss angemerkt werden, dass die Ergebnisse von Gewächshausstudien unter kontrollierten Bedingungen nicht ohne weiteres mit Feldexperimenten verglichen werden können, da es im Feld auf Grund komplexer Interaktionen und Prozesse im „System Boden“ zu grundsätzlich abweichenden Beobachtungen kommen kann.

Insgesamt können drei Herausforderungen in Bezug auf den Einsatz von Biostimulanzien identifiziert werden:

- 1) Produktvielseitigkeit
- 2) Eingeschränktes Wissen über Produktzusammensetzung
- 3) Verfügbare Produkte

Biostimulanzien unterscheiden sich hinsichtlich ihrer vielseitigen Wirkungen (Produktvielseitigkeit) wesentlich von konventionellen landwirtschaftlichen Betriebsmitteln wie Dünger- oder Pflanzenschutzmitteln. Während der erwartete Effekt bei einer N-Dünger Applikation beispielsweise die Versorgung der Pflanzen mit N ist, kann der erwartete Effekt von Biostimulanzien je nach Applikationsart und Zeitpunkt erheblich variieren (z.B. Saatgutbehandlung vs. Blattspritzung) (SIBLE, 2022: 34).

Eine weitere Herausforderung ist das eingeschränkte Wissen über die genaue Produktzusammensetzung. So werden in der Praxis häufig Effekte beobachtet, ohne genau zu wissen, welche Komponente dafür verantwortlich ist oder wie die Wirkung von einzelnen Komponenten durch andere agronomische Maßnahmen beeinflusst wird (SIBLE, 2022: 35 ff.).

Die dritte Herausforderung bezieht sich auf die Anzahl an verfügbaren Produkten. Da weniger rechtliche Auflagen für die Produktentwicklung bestehen als z.B. bei Pestiziden, ist die Anzahl von Neuentwicklungen deutlich höher. Dadurch sind insgesamt deutlich mehr Produkte verfügbar als in jedem anderen Markt für landwirtschaftliche Betriebsmittel (SIBLE, 2022: 35).

Insgesamt ist die Idee pflanzenwachstumsfördernde Substanzen und MO zu applizieren sehr interessant jedoch stellen LEINWEBER ET AL., 2018: 4 fest, dass es auf Grund der Unsicherheit und den Kosten, die mit dem Einsatz von Biostimulanzien verbunden sind, sinnvoller erscheint zunächst das natürliche Mikrobiom des Bodens durch angepasste agronomische Maßnahmen wie ausbleibende BB und ZF-Anbau zu fördern.

Gesamtfazit

Das Wissen, wie sich pflanzenbauliche Maßnahmen auf Schlüsselparameter der Bodengesundheit wie das Bodenleben und den C_{org}-Gehalt auswirken ist essentiell, um ökonomisch sowie ökologisch zukunftsfähige Anbausysteme umsetzen zu können (SCHMIDT ET AL., 2018: 1). Insbesondere in Anbetracht des Klimawandels und der damit verbundenen zunehmenden Häufigkeit von Extremwetterereignissen ist die Aneignung und Vermittlung dieses Wissens unabdingbar. Es konnte gezeigt werden, dass zukunftsweisende Maßnahmen wie ZF-Anbau, Intercropping und Direktsaat insbesondere die Bodenparameter der oberen Bodenschicht (bis 10-15 cm) maßgeblich positiv beeinflussen. Damit einhergehend können positive Nebeneffekte, wie die Reduzierung von Bodenerosion, Eutrophierung von Gewässern und Nährstoffauswaschung realisiert werden (RODGERS ET AL., 2021: 4) (KIM ET AL., 2020: 1). Insgesamt muss also der Grundsatz verfolgt werden, den Boden so häufig wie möglich mit Pflanzen bedeckt zu halten und dabei möglichst wenig in das natürliche Bodengefüge einzugreifen und ähnlich natürlichen Ökosystemen das volle C-Assimilationspotential auszunutzen (LAL ET AL., 2015: 4). Dadurch kann die Bodengesundheit mittelfristig signifikant verbessert werden.

5.7 Nutzung von Controlled Traffic Farming

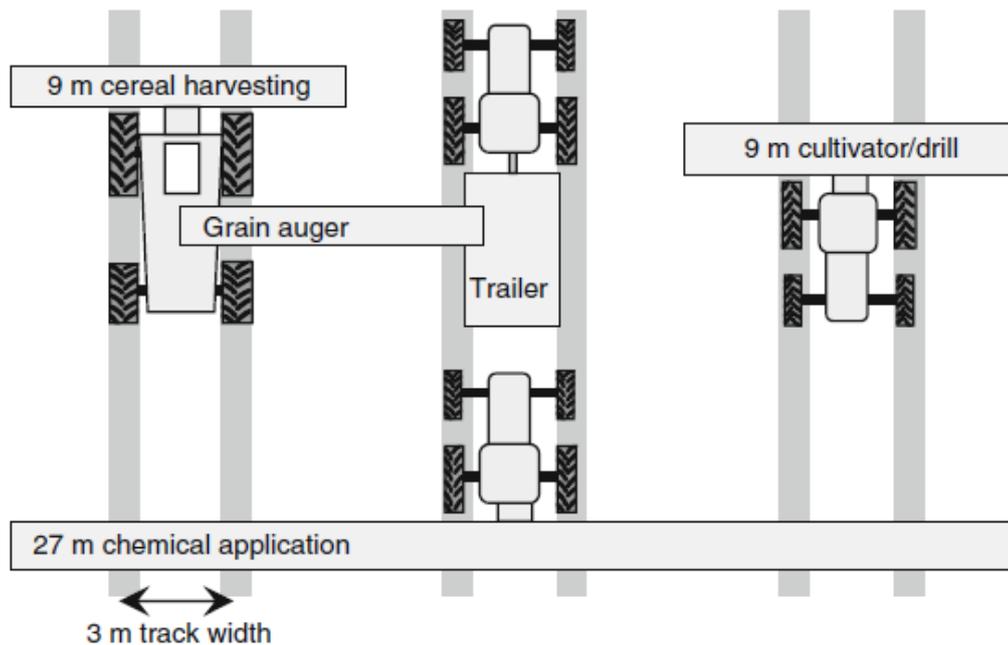
Das ungeplante Befahren von landwirtschaftlichen Flächen wird als Random Traffic Farming (RTF) bezeichnet. In den weit verbreiteten RTF-Systemen werden je nach Intensität der BB bis zu 100 % der Fläche während eines Anbaujahres befahren (GASSO ET AL., 2013: 2) (GALAMBOŠOVÁ ET AL., 2017: 2). Durch Reduzierung von Arbeitsgängen, wie beispielsweise der BB, kann die befahrene Fläche zwar reduziert werden, jedoch beträgt der Anteil selbst in RTF-Direktsaatsystemen häufig immer noch über 30 % (HAMZA U. ANDERSON, 2005: 5). Damit einhergehend steigt die Gefahr von Bodenschadverdichtungen signifikant an. Deren Auswirkungen, wie beispielsweise die Einschränkung des Wurzelwachstums, der Wasserinfiltration und des Gasaustausches sowie die Förderung von Bodenerosion, Emissionen und Nährstoffverlusten wurden zu Beginn dieser Untersuchung ausführlich dargestellt. Insbesondere in tieferen Bodenschichten (> 35 cm) ist eine Bodenschadverdichtung besonders negativ zu bewerten, da Prozesse der natürlichen Bodenregeneration, wie beispielsweise Frost- und Tauzyklen, sowie anthropogene Maßnahmen wie eine Tiefenlockerung häufig wenig wirksam sind (GALAMBOŠOVÁ ET AL., 2017: 1 ff.) (TAMIRAT ET AL., 2022: 1). Deshalb müssen moderne und langfristig tragfähige Anbausysteme auf die bestmögliche Vermeidung von Bodenschadverdichtungen abzielen, um diese gar nicht erst entstehen zu lassen (CHAMEN ET AL., 2003: 3) (ANTILLE ET AL., 2019: 3). Dieser Zusammenhang hat zu der Entwicklung von Controlled Traffic Farming (CTF) Systemen beigetragen.

Bei CTF handelt es sich um einen ganzheitlichen Ansatz zur Reduzierung von Bodenschadverdichtungen auf das kleinstmögliche Maß, indem permanente Fahrgassen etabliert werden und somit die strikte Unterteilung der Fläche in eine „Wachstumszone“ und eine „Verkehrszone“ erfolgt (GASSO ET AL., 2013: 2) (DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 109). Dadurch können Bodenverdichtungen in der Wachstumszone vermieden werden und gleichzeitig die Befahrbarkeit durch die stark verdichteten Fahrgassen erhöht werden (PEDERSEN ET AL., 2016: 2).

Die Umsetzung des CTF-Systems setzt zum einen ein RTK-GNSS-System voraus (Global Navigation Satellite System) und zum anderen identische Spurweiten aller eingesetzten Landmaschinen (TULLBERG, 2010: 5). Darüber hinaus muss die Arbeitsbreite von Maschinen, die der Bestandspflege dienen, wie z.B. Pflanzenschutzspritzen oder

Düngerstreuern ein Vielfaches der Basisarbeitsbreite entsprechen. Diese wird häufig von der Arbeitsbreite der Sämaschine und/oder des Mähdreschers bestimmt (TAMIRAT ET AL., 2022: 2) (ANTILLE ET AL., 2019: 5).

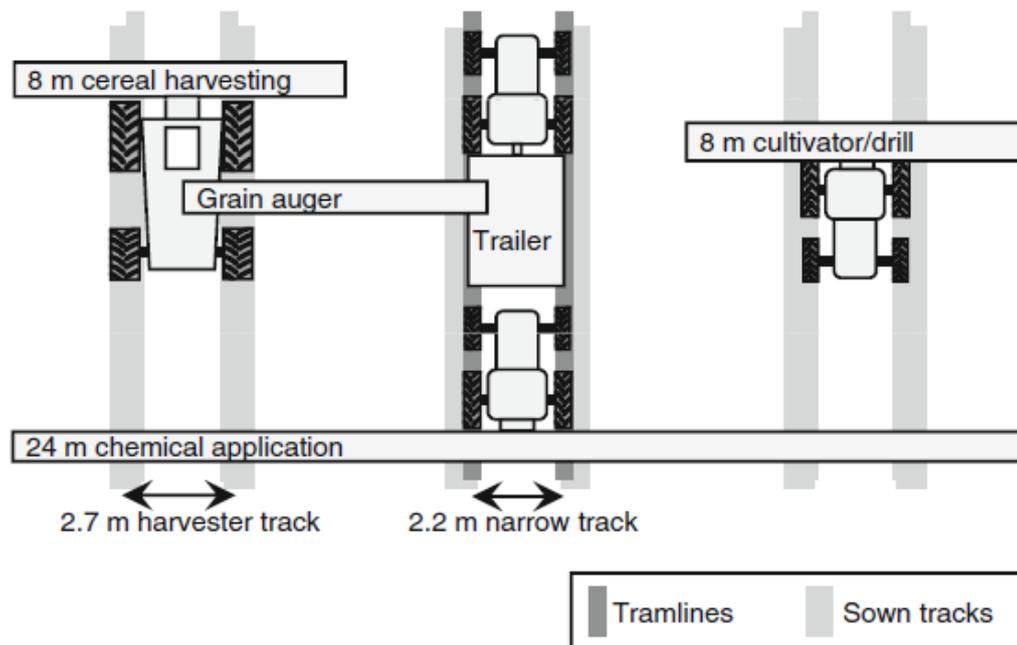
Abbildung 18: CTF-System mit 9 m Basisarbeitsbreite, 27 m Bestandespflege und 3 m Spurweite



Quelle: DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 111

Abbildung 18 zeigt ein für Australien typisches CTF-System. Die Basisarbeitsbreite entspricht dabei 9 m und die Maschinen zur Bestandespflege sind dreimal so breit (27 m). DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 110 ff. stellen fest, dass insbesondere in großstrukturierten Gegenden CTF-Systeme mit 12 m Basisarbeitsbreite, 36 m Bestandespflege und 3 m Spurweite auch weit verbreitet sind. Im Falle von 500 mm breiten Reifen werden nur maximal 12 % der Fläche befahren. Typisch für Australien ist die an die Erntemaschine angepasste Spurweite von 3 m. Da eine Spurweite von 3 m in manchen Teilen Europas auf Grund des Straßenverkehrsrechtes zu Problemen führen würde, wurden CTF-Systeme entwickelt, die in Bezug auf die Spurweite an die europäischen Strukturen angepasst sind. Ein Beispiel dafür ist das OutTrac-System:

Abbildung 19: OutTrac-System mit 8 m Basisarbeitsbreite, 24 m Bestandespflege und zwei verschiedenen Spurweiten (2,7 m Mähdrescher) (2,2 m Traktor etc.)



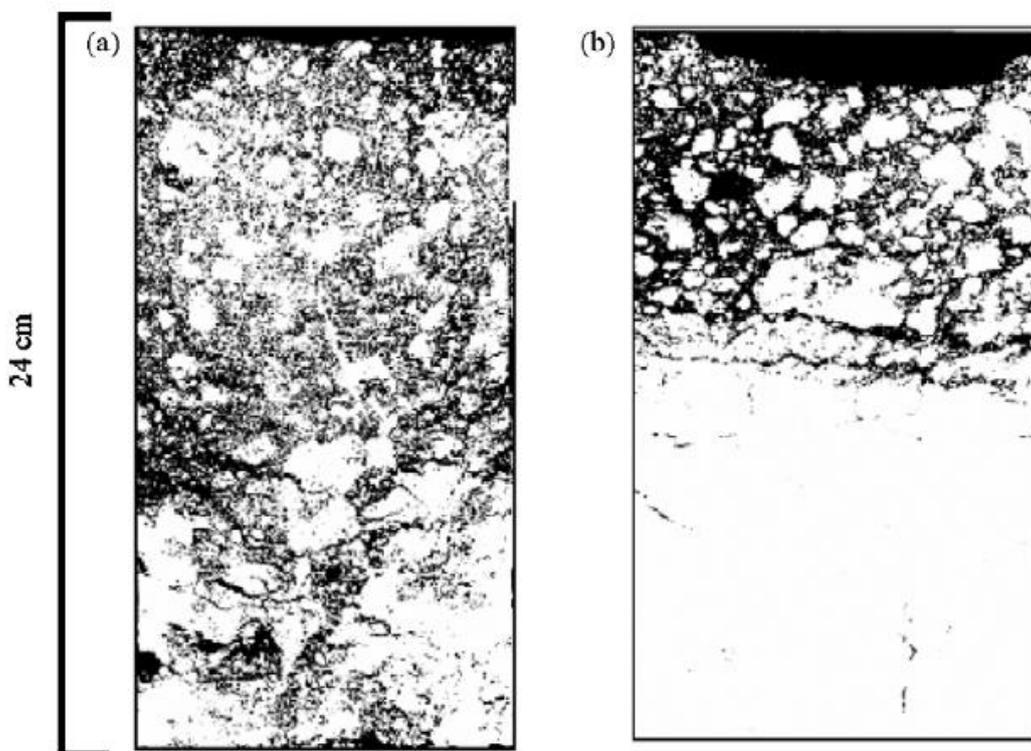
Quelle: DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 112

Abbildung 19 zeigt mit dem OutTrac-System ein Ansatz, welches die Umsetzung des CTF-Systems unter straßenverkehrsrechtlichen Restriktionen ermöglicht. Dabei werden zwei verschiedene Spurweiten genutzt. Eine weite Spur im Falle der Erntemaschine und eine engere Spur für alle weiteren Landmaschinen (z.B. Traktoren). In der Annahme, dass die Reifenbreite des Mähdreschers 800 mm und die der sonstigen Landmaschinen 500 mm beträgt, werden in diesem Fall 22,5 % der Fläche befahren (DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 112).

Vorteile von Controlled Traffic Farming

Die strikte Trennung von Wachstums- und Verkehrszonen durch die Etablierung von permanenten Fahrgassen bringt einige agronomische, umweltbezogene und ökonomische Vorteile mit sich. ANTILLE ET AL., 2015: 3 sehen die Etablierung von CTF sogar als notwendige Voraussetzung für ein erfolgreiches Direktsaatsystem.

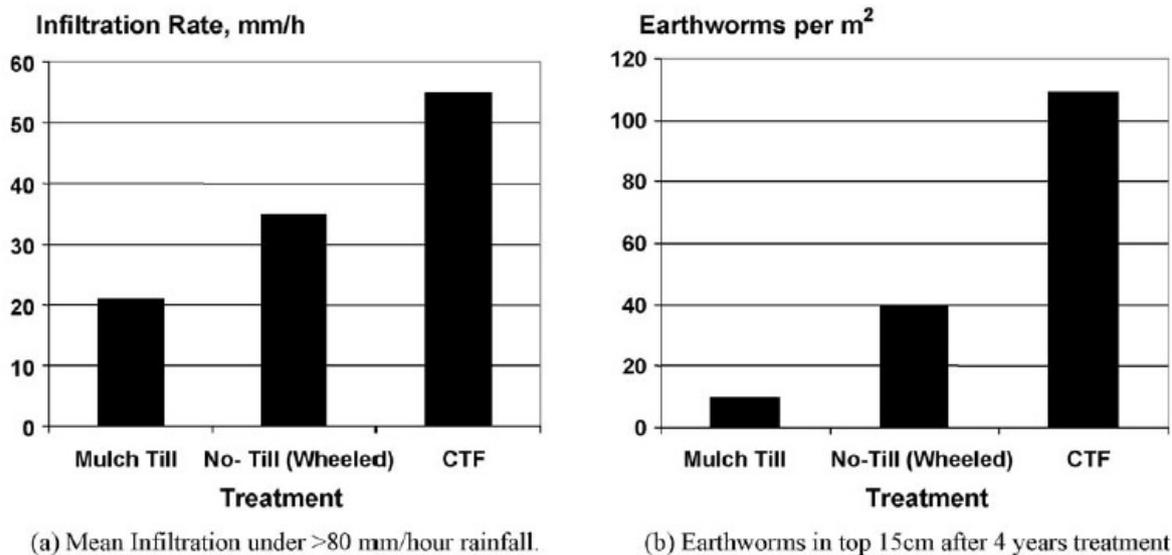
Abbildung 20: Binäre Bilder der Bodenstruktur in einem Vertisol bis 24 cm Bodentiefe. (a) zeigt das Bodenprofil unter CTF-Direktsaat und (b) das Bodenprofil unter RTF-Direktsaat bei gleicher Fruchtfolge



Quelle: TULLBERG ET AL., 2007: 4

Abbildung 20 unterstützt die These von ANTILLE ET AL., 2015, dass CTF eine wichtige Voraussetzung für ein erfolgreiches Direktsaatsystem ist. Während das Bodenprofil unter CTF-Direktsaat (a) ein stark verzweigtes Porensystem aufweist (schwarz), ist bei dem Bodenprofil unter RTF-Direktsaat ab 10 cm ein stark verdichteter Horizont festzustellen (weiß). Dieser wirkt sich äußerst negativ auf wichtige Bodenfunktionen, wie beispielsweise die Wasserinfiltrationsleistung aus wie die folgenden Abbildungen zeigen:

Abbildung 21: Effekte von verschiedenen BB-Varianten und Befahrungsintensitäten auf die Wasserinfiltration und Regenwurmabundanz in einem Vertisol



Quelle: TULLBERG, 2010: 2

Bei den Ergebnissen eines 4-jährigen Feldversuches in Australien in Abbildung 21 können folgende Varianten unterschieden werden:

Mulch Till: Dieses Verfahren der reduzierten BB ist gekennzeichnet durch 1-3 Arbeitsgänge mit Zinkenwerkzeugen, wobei der Boden unkontrolliert befahren wird (RTF).

No-Till (Wheeled): Diese Variante impliziert RTF-Direktsaat (unkontrolliertes Befahren, keine BB).

CTF: In dieser Variante wurde CTF mit Direktsaat kombiniert (Spurflächenanteil von 10-15 %) (TULLBERG, 2010: 2)

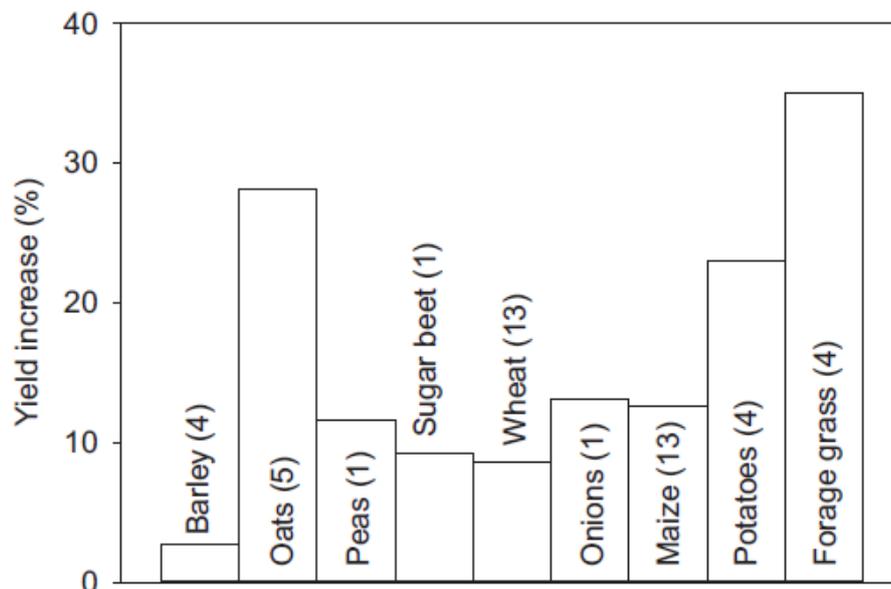
Diese Ergebnisse können durch den bereits dargestellten Zusammenhang zwischen der Regenwurmhäufigkeit und den damit entstehenden Bioporen und der Zunahme der Wasserinfiltrationsleistung des Bodens erklärt werden. Abbildung 21 zeigt, dass es zu einem kumulativen Effekt zwischen BB und der Befahrung des Bodens auf die Regenwurmpopulation und die Wasserinfiltration kommt, weshalb die Kombination von CTF und Direktsaat gegenüber den anderen Varianten erhebliche Vorteile bietet.

Ein weiterer Vorteil von CTF-Systemen ist die zunehmende Termingerechtigkeit mit der anfallende Ackerarbeiten durchgeführt werden können.

So stellen DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 119 fest, dass durch die permanenten und stark verdichteten Fahrgassen in der Regel eine frühere Aussaat möglich ist und dass die möglichen Einsatztage auf dem Acker signifikant zunehmen, so dass Maßnahmen der Bestandespflege, wie Pflanzenschutz oder Düngung zum optimalen Zeitpunkt ausgeführt werden können (DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 119). Darüber hinaus ergibt sich durch die verbesserte Termingerechtigkeit die Möglichkeit des Zweitfruchtbaus in Regionen, in denen es vorher nicht möglich war. So kann insbesondere in ariden Regionen Australiens Regenwasser genutzt werden, um zusätzliches Einkommen zu generieren (TULLBERG ET AL., 2007: 7) (GALAMBOŠOVÁ ET AL., 2017: 2).

In der wissenschaftlichen Literatur wurden zudem in zahlreichen Studien Ertragszuwächse, die auf die Einführung von CTF-Systemen zurückzuführen sind, nachgewiesen.

Abbildung 22: Ertragszuwachs verschiedener Fruchtarten durch Umstellung von RTF auf CTF. Die Zahlen in Klammern beziehen sich auf die Studienanzahl von denen Daten genutzt wurden



Quelle: CHAMEN ET AL., 2015: 6

Abbildung 22 zeigt die Ergebnisse einer Metaanalyse von CHAMEN ET AL., 2015 wonach es durch die Umstellung von RTF auf CTF zu Ertragszuwächsen zwischen 3 und 35 % kommen kann. Die erhebliche Variabilität ist auf verschiedene Faktoren, wie beispielsweise die

Bodenart, die Fruchtart, den Verdichtungszustand etc., zurückzuführen und wurde auch in anderen Studien beobachtet (TULLBERG, 2010: 2). Darüber hinaus ist zu beachten, dass es sich bei Untersuchungen zum Ertragszuwachs in den meisten Fällen um sogenannte „Side-by-Side“-Versuche handelt. Dabei werden die gleichen Maßnahmen zur gleichen Zeit auf der RTF sowie CTF Parzelle durchgeführt. In diesem Fall werden die positiven Ertragseffekte des CTF-Systems ausschließlich durch eine Optimierung der Bodenstruktur (z.B. erhöhte Porosität, bessere Wasserinfiltration etc.) hervorgerufen. TULLBERG, 2010: 2 weist jedoch darauf hin, dass die sogenannten „System-Effekte“, die maßgeblich auf einer verbesserten Befahrbarkeit basieren, zu deutlich höheren Ertragszuwächsen führen können. So können Flächen nach einem Regenereignis früher wieder befahren werden und Betriebsmittel können zum optimalen Zeitpunkt ausgebracht werden. Um die System-Effekte umfassend untersuchen zu können, müsste also die Durchführung der Maßnahmen entsprechend der Befahrbarkeit im CTF-System angepasst werden.

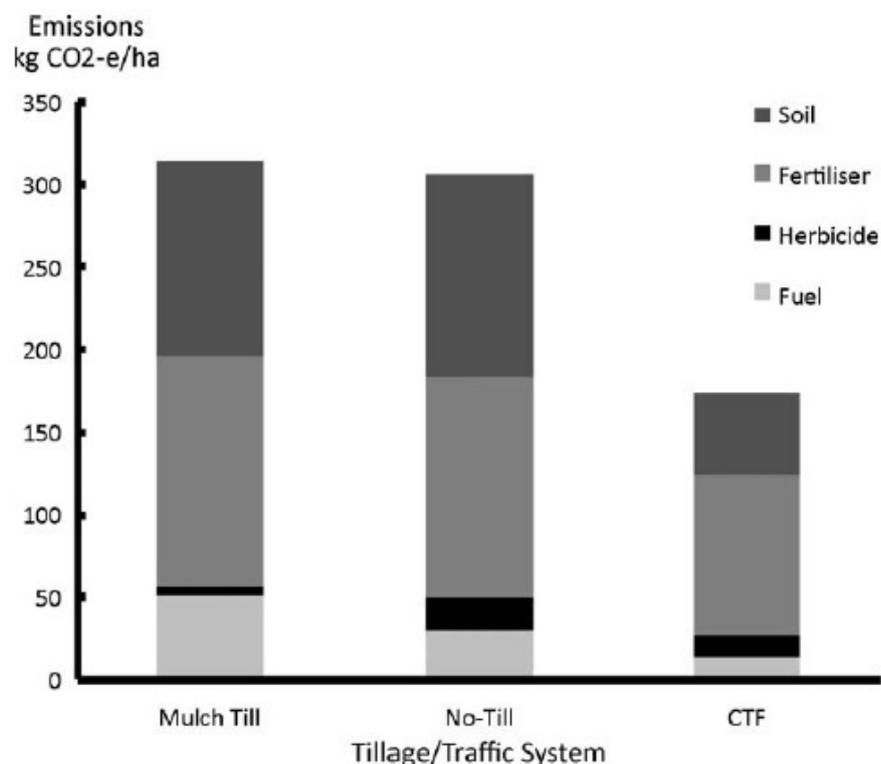
Zusätzlich zu Ertragssteigerungen bietet die Etablierung von CTF auch die Möglichkeit der Energieeinsparung. In Studien wurde ein Energieeinsparpotential von 70-90 % ermittelt, wenn Bodenschadverdichtungen in der Wachstumszone vermieden werden (DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 120) (ANTILLE ET AL., 2015: 6). Dieses Potenzial ergibt sich aus einem geringeren spezifischen Bodenwiderstand für alle im Boden arbeitenden Werkzeuge, flacheren Bodenbearbeitungsgängen, da tiefe Lockerungen nicht mehr notwendig sind sowie einem geringeren Rollwiderstand auf den stark verdichteten permanenten Fahrgassen (ANTILLE ET AL., 2015: 6). So wurde in einer Untersuchung festgestellt, dass der Zugkraftbedarf von Säaggregaten und Zinken, die hinter einem Traktorräder liefen, um den Faktor 1,6 bis 2,2 erhöht waren (TULLBERG ET AL., 2007: 3).

Ein weiterer wichtiger Vorteil von CTF ist der Effekt auf die N-Nutzungseffizienz. Bis zu 70 % der Treibhausgasemissionen im Ackerbau können mit der Nutzung von N-Düngemitteln assoziiert werden. Zum einen entstehen CO₂-Emissionen bei der Produktion und dem Transport und zum anderen kommt es zu N₂O-Emissionen nach der Ausbringung (ANTILLE ET AL., 2015: 1). Die N-Nutzungseffizienz von mineralischen N-Düngern beträgt in der Regel nur 30-40 %, was impliziert, dass nur etwa ein Drittel des ausgebrachten N tatsächlich von der Pflanze aufgenommen wird. Die restlichen zwei Drittel gehen in Form von gasförmigen Verlusten, durch Auswaschung oder Bodenabtrag verloren. Die Etablierung von CTF kann hierbei durch die Verbesserung der Bodenstruktur (erhöhtes Porenvolumen, weniger Staunässe etc.) sowie der optimalen Synchronisierung des

Pflanzenbedarfes und des Nährstoffangebotes durch den passenden Ausbringtermin einen entscheidenden Beitrag leisten, die N-Nutzungseffizienz zu erhöhen (ANTILLE ET AL., 2015: 9) (GALAMBOŠOVÁ ET AL., 2017: 2). Dadurch können einerseits Emissionen, die mit der Produktion und Ausbringung von Düngemitteln verbunden sind, als auch der finanzielle Aufwand für mineralische Dünger, reduziert werden.

Auch die Treibhausgasemissionen eines Anbausystems werden durch die Umstellung auf CTF signifikant beeinflusst. Einerseits in Form von verminderten CO₂-Emissionen, die maßgeblich mit der bereits dargestellten Energieeinsparung verbunden sind (Reduzierter Zugkraftbedarf, Reduzierter Rollwiderstand, Flachere oder ausbleibende BB etc.) und andererseits durch eine verbesserte Bodenstruktur und dem damit einhergehenden Effekt auf Methan- (CH₄), Lachgas- (N₂O) und Ammoniakemissionen (NH₃) (GASSO ET AL., 2013: 3 ff.) (TULLBERG, 2010: 4). In einer Studie von GASSO ET AL., 2013 in der alle Feldarbeiten außer die BB und die Ernte als CTF umgesetzt wurden, konnte nach 5 Jahren eine Reduzierung der Methanemissionen um 372-2100 %, der Lachgasemissionen um 21-45 % und der Ammoniakemissionen um 8 % gegenüber RTF festgestellt werden.

Abbildung 23: Emissionen angegeben in CO₂-Äquivalenten von Mulch Till (Reduzierte BB + RTF), No-Till/Traffic System (Direktsaat + RTF) und CTF (Direktsaat + CTF)



Quelle: TULLBERG, 2010: 5

Abbildung 23 zeigt, dass durch die Kombination von CTF und Direktsaat erhebliche Emissionseinsparungen möglich sind. Dies ist auf die Verringerung von Emissionen, die mit einer schlechten Bodenstruktur zusammenhängen (CH₄, N₂O, NH₃), als auch eine erhöhte N-Nutzungseffizienz sowie dem reduzierten Einsatz von fossilen Brennstoffen zurückzuführen. Da die CO₂-Äquivalente in diesem Fall auf einer Hektar-Basis angegeben sind, kann davon ausgegangen werden, dass die Emissionseinsparung bei der Angabe pro Produkteinheit noch größer ausfällt auf Grund des zu erwartenden Ertragszuwachses.

Insbesondere in Anbetracht zunehmender Herbizidresistenzen und dem Wegfall wichtiger Wirkstoffe ist eine Diversifizierung des Pflanzenschutzes erforderlich. Auch hier bietet das CTF-System in Bezug auf die mechanische Unkrautkontrolle Vorteile, da die Wachstumszone deutlich ebener ist als in RTF-System (DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010, 119) (CHAMEN, 2015: 7). Somit kann die Hacke oder der Striegel äußerst flach und präzise eingestellt werden, ohne unnötig tief in den Boden einzugreifen aber trotzdem einen entsprechenden Behandlungserfolg zu erzielen.

Einhergehend mit den bereits beschriebenen Vorteilen von CTF, wirkt sich das kontrollierte Befahren von Flächen auch auf die Wirtschaftlichkeit eines Betriebes aus.

Tabelle 3: Umsatzsteigerungen als Ergebnis von Ertragszuwächsen verschiedener CTF-Systeme (Preise wurden vom slowakischen Landwirtschaftsministerium ermittelt)

| Year | Retail Price (€ tonne ⁻¹) | Revenue increase (€ ha ⁻¹) | | | |
|--------------|--|--|------------------|------------------|-------------------|
| | | 6-m Out track | 8-m Out track | 8-m Com track | 12-m Com track |
| 2011 | 196 | 55 | 59 | 73 | 71 |
| 2012 | 209 | 82 | 102 | 92 | 107 |
| 2013 | 167 | 42 | 72 | 57 | 67 |
| Mean revenue | | 59 | 78 | 74 | 81 |

Quelle: ANTILLE ET AL., 2019: 18

In Tabelle 3 sind die durchschnittlichen Umsatzsteigerungen der verschiedenen CTF-Systeme gegenüber RTF gelb markiert. Es kann beobachtet werden, dass sich der Ertrags- und damit auch der Umsatzzuwachs proportional zur Reduzierung der befahrenen Fläche verhält und somit CTF-Systeme mit größeren Basisarbeitsbreiten (Bsp. 12 m vs. 6 m) höhere Umsatzsteigerungen versprechen (ANTILLE ET AL., 2019: 18).

Gleichzeitig werden in CTF-Systemen jedoch auch die variablen Kosten maßgeblich reduziert, wodurch letztlich eine deutliche Profitsteigerung gegenüber RTF möglich sein sollte, nachdem Investitionen in entsprechende Technik getätigt wurden.

Herausforderungen von Controlled Traffic Farming

Neben zahlreichen Vorteilen bringen CTF-Systeme allerdings auch Herausforderungen mit sich. Dazu gehört beispielsweise eine reduzierte Effizienz des Feldeinsatzes, insbesondere bei Feldarbeiten, die eine entsprechende Logistik erfordern (z.B. Gülleausbringung oder Ernte). Im Falle der Gülleausbringung beispielsweise kann nicht einfach der kürzeste Weg zum Zubringerfahrzeug gewählt werden, wodurch der Anteil unproduktiv zurückgelegter Strecke zunimmt (TAMIRAT ET AL., 2022: 2). GASSO ET AL., 2013 stellen in diesem Zusammenhang fest, dass diese unproduktiv zurückgelegte Strecke in CTF-Systemen je nach Arbeitsgang um 24-47 % erhöht sein kann gegenüber RTF-Systemen.

Eine weitere Herausforderung ist die erforderliche Investition in die Modifikation vorhandener Technik oder die Anschaffung neuer Technik (TAMIRAT ET AL., 2022: 2). Typische Maschinenanpassungen umfassen die Anpassung der Spurweite oder die Verlängerung des Entladerohrs von Mähreschern, so dass dieses bis zur benachbarten Fahrgasse reicht (DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 123). Zugleich wird die erforderliche Investitionsbereitschaft durch mangelndes Vertrauen in die beschriebenen Vorteile von CTF, insbesondere unter den lokalen Bedingungen der Landwirte, reduziert (TAMIRAT ET AL., 2022: 2). Hier könnten Feldtage und andere Informationsveranstaltungen öffentlicher Einrichtungen Abhilfe schaffen.

Auch die Strohverteilung ist eine bekannte Herausforderung, da konventionelle Mährescher bei Schneidwerksbreiten von 9 m und darüber hinaus an die Grenzen einer homogenen Strohverteilung über die gesamte Arbeitsbreite kommen (DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010: 123). Da auch der Einsatz eines Strohstriegels nicht praktikabel ist, weil nicht im Winkel zur Mährescher Spur gearbeitet werden kann, ist dieser Aspekt eine echte Herausforderung, insbesondere in Direktsaatsystemen. Darüber hinaus kann es zu Problemen bei dem Anbau von Reihenkulturen, wie Mais und Sojabohnen, in CTF-Direktsaat kommen, da die Säaggregate bei gleicher Reihenweite auf Grund der

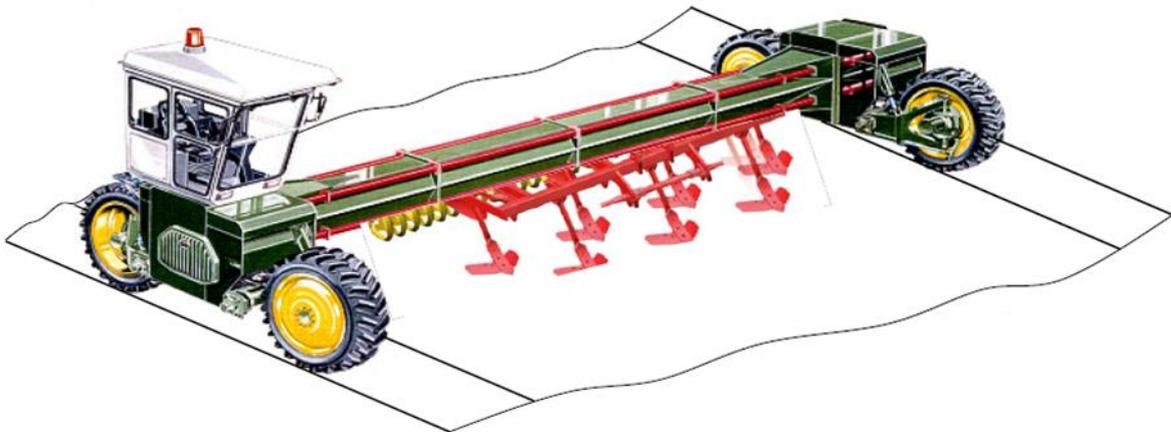
permanenten Fahrspuren exakt in der Stoppelreihe der vorherigen Kultur laufen würden. Abhilfe kann hier gegebenenfalls ein Verschieberahmen für die Säaggregate schaffen, wodurch ein geringer Versatz realisiert werden kann.

Trotz der zahlreichen Vorteile, die das CTF-System bietet, ist dessen Verbreitung global betrachtet relativ eingeschränkt (GALAMBOŠOVÁ ET AL., 2017: 2). PEDERSEN ET AL., 2016 führen dies auf die Herausforderungen zurück, die mit der Nutzung von konventionellen Landmaschinen in CTF-Systemen verbunden sind. Dazu zählen beispielsweise straßenverkehrsrechtliche Restriktionen hinsichtlich der Spurweite, ein je nach CTF-System immer noch relativ hoher Spurfächenanteil oder die geringe Flexibilität unterschiedlicher Arbeitsbreiten innerhalb eines CTF-Systems.

Das Potenzial von Widespan Controlled Traffic Farming

Ein vielversprechendes Konzept zur Lösung der beschriebenen Problematik stellen sogenannte Wide-Span-Fahrzeuge (WS-Fahrzeuge) dar:

Abbildung 24: Konzept eines WS-Fahrzeuges von Dowler aus den 1980er Jahren

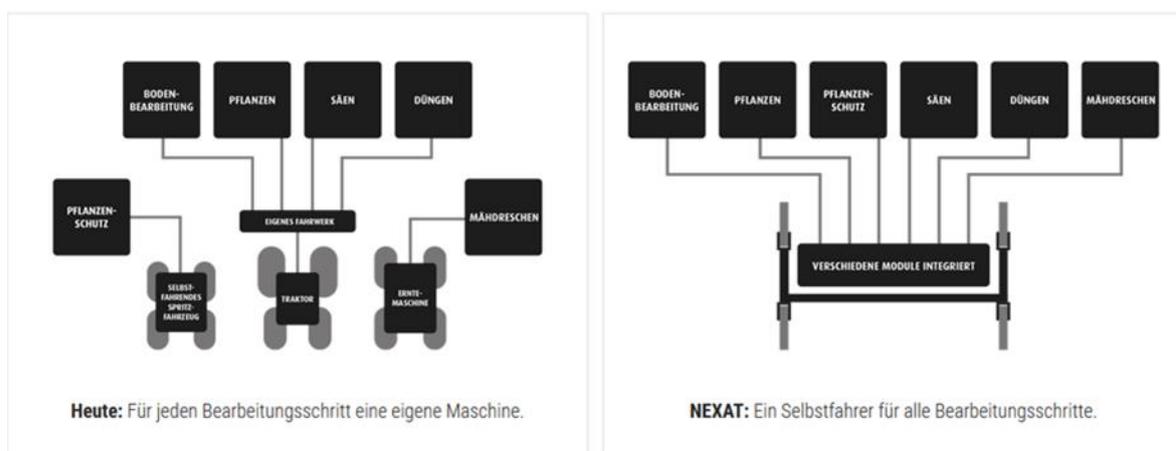


Quelle: BULGAKOV ET AL., 2017: 2

Der grundsätzliche Aufbau von WS-Fahrzeugen, die in den 1980er Jahren hauptsächlich für Forschungszwecke verwendet wurden, ist immer gleich. Ein Hauptrahmen verbindet zwei Seitenteile, an denen sich jeweils ein Fahrwerk mit je zwei Rädern befindet.

Zum Wechsel von der Arbeitsstellung (siehe Abbildung 24) in die Transportstellung werden die Räder um 90° gedreht, so dass das Fahrzeug lang und schmal in der Transportstellung von Fläche zu Fläche fahren kann, ohne die straßenverkehrsrechtlichen Bestimmungen zu überschreiten (PEDERSEN ET AL., 2016: 2). In Abhängigkeit des Anwendungsgebietes kann entweder die komplette Zwischenachsspanne als Anbauraum genutzt werden oder aber auch nur ein Teil der verfügbaren Spanne (z.B. Gemüseanbau) (CHAMEN ET AL., 1992: 2). Darüber hinaus ist es für Maßnahmen der Bestandespflege auch möglich Arbeitsbreiten zu nutzen, die einem Vielfachen der Zwischenachsspanne entsprechen.

Abbildung 25: Konventioneller Fuhrpark im Vergleich mit einem WS-System



Quelle: KALVERKAMP MASCHINENBAU, 2023a

Abbildung 25 zeigt den Unterschied zwischen dem konventionellen Fuhrpark eines landwirtschaftlichen Betriebes und dem WS-System. Im Falle des WS-Systems wird letztlich jeder Arbeitsgang von einem Selbstfahrer erledigt, da die verschiedenen Anbaugeräte (z.B. Bodenbearbeitung oder Aussaat) einfach in das WS-Fahrzeug integriert werden.

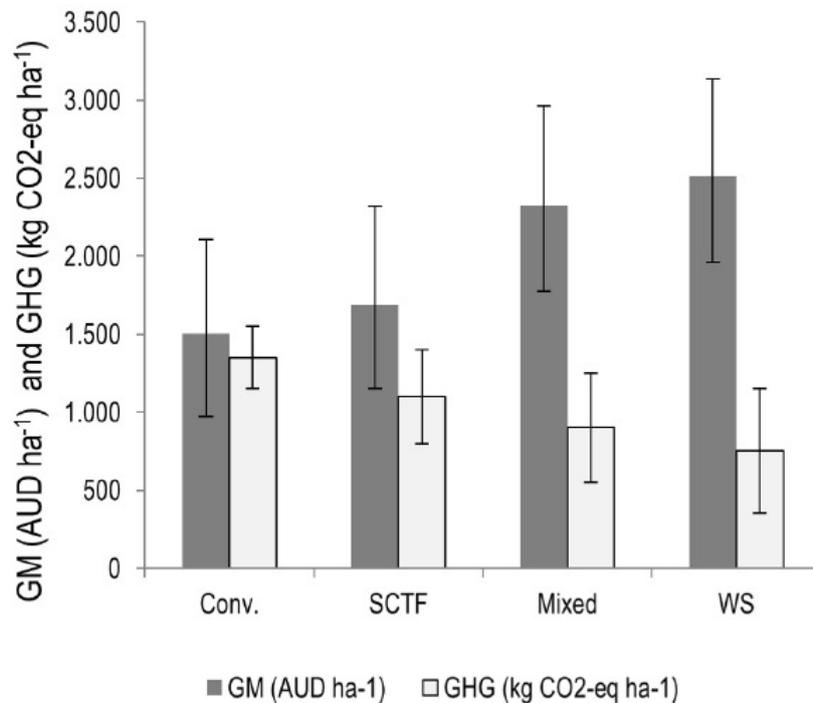
Der große Vorteil hinsichtlich des Aufbaus von WS-Fahrzeugen ergibt sich durch die Anordnung der Räder außerhalb der Arbeitsbreite, wodurch bei der Hin- und Rückfahrt auf einer Fläche mit z.B. einem Bodenbearbeitungsgerät nicht vier Fahrspuren entstehen, sondern nur drei, weil eine Fahrspur immer doppelt genutzt wird (ÖNAL, 2012: 10). Dadurch werden verglichen mit einem konventionellen Traktorgespann nur die Hälfte der Fahrspuren erzeugt (CHAMEN ET AL., 1992: 2).

Während der minimale Spurflächenanteil in einem CTF-System, welches auf konventioneller Technik basiert, bei ca. 13 % liegt, kann der Spurflächenanteil durch den Einsatz von WS-Fahrzeugen auf < 10 % reduziert werden (CHAMEN, 2015: 8). DEDOUSIS U. BARTZANAS, 2010 konstatieren deshalb, dass WS-Fahrzeuge die optimale Lösung zur Umsetzung von CTF sind.

Weitere Vorteile, die mit dem Aufbau von WS-Fahrzeugen verbunden sind, ergeben sich durch die breite Aufstandsfläche in Feldfahrt, wodurch z.B. Spritzgestänge mit höherer Arbeitsbreite deutlich präziser geführt werden können (CHAMEN, 2015: 8) (ÖNAL, 2012: 10). Zudem wird die Arbeit am Hang wesentlich erleichtert, da z.B. die Säaggregate auf Grund der Integration in das WS-Fahrzeug nicht hangabwärts driften können. Darüber hinaus können Anbaugeräte mit großen Arbeitsbreiten relativ kostengünstig realisiert werden, da weder ein Klappmechanismus noch ein Fahrwerk benötigt werden (ÖNAL, 2012: 10). Letztendlich besteht ein WS-Bodenbearbeitungsgerät oder eine WS-Sämaschine nur aus einem starren Rahmen, an den die entsprechenden Werkzeuge oder Säaggregate angeklemt sind.

Neben der Nutzung im gewöhnlichen Ackerbau bringt die Nutzung von WS-CTF auch im Gemüseanbau große Vorteile mit sich. Da der Anbau von Gemüse äußerst intensiv und mit zahlreichen Arbeitsgängen verbunden ist sowie in Beeten erfolgt, ist ein WS-Fahrzeug prädestiniert für diesen Einsatz.

Abbildung 26: Bruttomarge und Treibhausgasemissionen angegeben in kg CO₂-Äquivalente einer modellierten Fallstudie in einer tasmanischen Gemüsefruchtfolge



GM = Gross Margin; GHG = Greenhouse Gas Emissions; AUD = Australische Dollar Conv. = RTF-System; SCTF = CTF-System bis auf Erntevorgang, Mixed = Nutzung von WS-Fahrzeugen in Kombination mit konventioneller Landtechnik aber als CTF-System WS = Wide Span CTF

Fehlerbalken zeigen das 95 % Konfidenzintervall

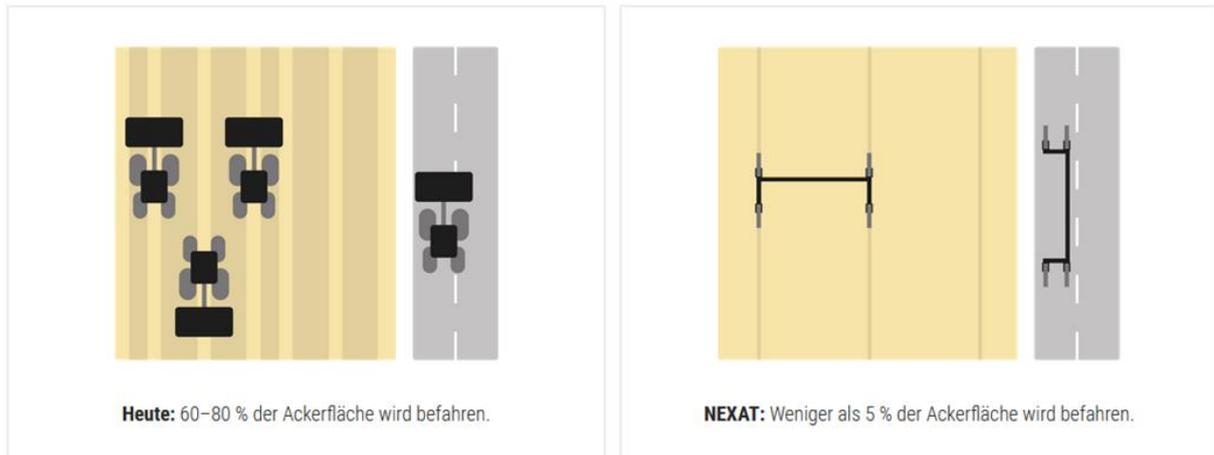
Quelle: PEDERSEN ET AL., 2016: 5

Die Ergebnisse der modellierten Fallstudie der tasmanischen Gemüseproduktion in Abbildung 26 zeigen, dass die Bruttomarge eines 200 ha umfassenden Gemüsebetriebes bei der Umstellung von RTF mit konventioneller Technik auf ein WS-CTF-System um bis zu 67 % steigen kann (PEDERSEN ET AL., 2016: 5). Gleichzeitig können die mit dem Gemüseanbau verbundenen Treibhausgasemissionen fast halbiert werden. Die dargestellten Steigerungen der Bruttomarge werden mit einer höheren Pflanzenpopulation auf Grund der breiteren Beete sowie einer wirtschaftlich optimierten Fruchtfolge, die durch die Vermeidung von Bodenschadverdichtungen möglich ist, erklärt (PEDERSEN ET AL., 2016: 5).

Das NEXAT-System

Nachdem in den 1990er Jahren einige Versuche WS-Fahrzeuge zu kommerzialisieren gescheitert sind, hat die Firma Kalverkamp Maschinenbau mit Sitz in Rieste, Landkreis Osnabrück, im Jahr 2021 ein serienreifes WS-Fahrzeug mit dem Namen NEXAT vorgestellt.

Abbildung 27: Vergleich Spurflächenanteil RTF und WS-CTF mit NEXAT



Quelle: KALVERKAMP MASCHINENBAU, 2023a

Mit der Nutzung des NEXAT WS-Fahrzeugs kann der Spurflächenanteil, wie in Abbildung 27 dargestellt, weiter reduziert werden (weniger als 5 %). Dies ist insbesondere auf die Fahrzeugbreite von 14 m zurückzuführen und auf die Tatsache, dass eine Fahrspur jeweils doppelt genutzt wird.

Abbildung 28: Das NEXAT WS-Fahrzeug der dritten Generation



Quelle: KALVERKAMP MASCHINENBAU, 2023b

In Abbildung 28 ist das 14 m breite NEXAT WS-Fahrzeug der dritten und aktuellsten Generation abgebildet. Je nach Anforderungen und Einsatzgebiet kann die Maschine entweder mit Rädern der Dimension IF 750/75 R46 (optional 900/64 R46) oder formschlüssigen Triangel-Raupenlaufwerken ausgestattet werden, wobei alle vier Räder oder Raupen gelenkt sind. Die Kabine ist in der Höhe verstellbar und um 180° schwenkbar, wodurch sich die Möglichkeit einer optimalen Anbaugeräteüberwachung ergibt. Aktuell setzt man auf ein dieselelektrisches Antriebskonzept mit zwei voneinander unabhängig arbeitenden Dieselmotoren, die je 550 PS Nennleistung liefern. Über einen Generator werden dann die vier elektrischen Radnabenmotoren angetrieben. Zukünftig sollen allerdings auch umweltfreundlichere Antriebskonzepte eingesetzt werden, die zum Beispiel auf Wasserstoff basieren. Die Fahrspurplanung erfolgt im Vorfeld des Feldeinsatzes über eine spezielle Software, die ebenfalls von Kalverkamp Maschinenbau entwickelt wurde, wobei ein genaues Einmessen der Feldgrenzen eine Grundvoraussetzung darstellt.

Abbildung 29: Modulwechsel des NEXAT-Systems



Quelle: KALVERKAMP MASCHINENBAU, 2023b

In Abbildung 29 ist der Modulwechsel abgebildet, der auf Grund von standardisierten Koppelpunkten und Schnellkupplern innerhalb von zehn Minuten erledigt werden kann und zukünftig auch autonom ablaufen soll. In diesem Fall wird nach dem Mähdrusch von dem Mähreschermodul NEXCO auf das Tanksystem mit Väderstad Carrier Scheibenegge umgebaut.

Die aktuell verfügbaren Module sind entweder in einer Zusammenarbeit mit namhaften Herstellern entstanden oder wurden komplett selbst entwickelt. Die folgenden Module sind aktuell verfügbar:

- Tanksystem bestehend aus fünf Einzeltanks mit insgesamt 20.400 l in Kombination mit 14 m Väderstad Carrier Scheibeneggenmodul, 14 m Väderstad Spirit Sämodul, oder 14 m Väderstad Proceed oder Tempo Einzelkornsaatmodul
- Dammann Pflanzenschutzmodul mit 18.000 l Behältervolumen und bis zu 70 m Gestängebreite
- NEXCO Erntemodul mit Aufteilung des Gutstromes in zwei gleichmäßige Gutströme quer zur Fahrtrichtung, inkl. Zwei Reinigungseinheiten und zwei Strohhäckslern und -verteiltern, wodurch das Problem der Strohverteilung in CTF-Systemen gelöst werden kann. Vorsätze von Geringhoff oder MacDon mit 15,20 m Arbeitsbreite.
- Wienhoff Güllemodul mit 32 m³ Fassungsvermögen inklusive 14 m Vogelsang Schleppschuhgestänge oder 14 m Väderstad Carrier Scheibenegge mit Gülleaufbau.

Auf Grund der standardisierten Schnittstellen ist eine Erweiterung der Module auch durch andere Hersteller relativ einfach umsetzbar.

6 Material und Methoden zur Identifikation von Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige und profitable Landbewirtschaftung in Verbindung mit dem Einsatz des NEXAT-Systems

In diesem Abschnitt wird zunächst die leitende Forschungsfrage dargestellt und im Anschluss die Vorgehensweise der Literaturrecherche beschrieben.

6.1 Leitende Forschungsfrage

In den vorhergehenden Abschnitten wurden wichtige Herausforderungen des Pflanzenbaus und potenzielle Lösungsansätze ausführlich dargestellt. Da keine Studie bekannt ist, die sich ausführlich und wissenschaftlich fundiert mit den empfohlenen Praktiken der Regenerativen Landwirtschaft vor dem Hintergrund des Einsatzes eines Wide-Span-Fahrzeuges auseinandersetzt, soll diese Literaturarbeit einen Beitrag zur Schließung dieser Forschungslücke liefern. Die Untersuchung wird dabei durch folgende Hauptforschungsfrage geleitet:

Welche allgemein gültigen Handlungsempfehlungen lassen sich aus den dargestellten pflanzenbaulichen Herausforderungen und möglichen Anpassungsstrategien für eine nachhaltige und profitable Landbewirtschaftung ableiten und wie kann das NEXAT-System zur Umsetzung dieser Handlungsempfehlungen beitragen?

6.2 Vorgehensweise der Literaturrecherche

Bei der Literaturrecherche wurde großer Wert auf die Sicherung der wissenschaftlichen Mindestqualitätsstandards gelegt, so dass sich die Quellenangaben in dieser Untersuchung fast ausschließlich auf peer-reviewte Journal Artikel beziehen. Für die Recherche der entsprechenden wissenschaftlichen Dokumente wurden hauptsächlich die wissenschaftlichen Suchmaschinen „Google Scholar“ sowie „Scopus“ genutzt. Folgende Suchbegriffe wurden dabei verwendet:

Herausforderungen Ackerbau, Green Revolution, Food System, Environmental Impacts, Biodiversity Conservation, Productivity, Environmental Factors, Terrestrial Ecosystem, Cropping Systems, Food Production, Regenerative Landwirtschaft, Regenerative Agriculture, Pflanzenbausystem, Nachhaltige Intensivierung, Erosion, Bodenerosion, Bodeneigenschaften, Climate Change, Water Erosion, Wind Erosion, Dust Bowl, Land Degradation, Soil Erosion, Bodenverdichtungen, Soil Compaction, Microbial Biomass, Biological Effects, Root Growth, Soil Fauna, Microbial Activity, Penetration Resistance, Ressource Accessibility, Schadverdichtungen, Plant Growth, Mechanical Compaction, Bulk Density, Degree of Compactness, Drivers, Axle Load, Gypsum, Subsoil Compaction, Glyphosate Use, Herbicides, Fungicides, Insecticides, Herbicide-Residues, Global Pesticide Use, Cost and Benefit, Bioindicators, Externality, Plant protection Products, Nitrogen Fertilizer, Long-term N-Application, Soil pH., Synthetic Nitrogen Fertilizers, Soil Nitrogen, Fertilizer-Use-Efficiency, Application Rate, Beef Manure, Plant Nutritional Status, Nutrient Distribution, Phosphorus Supply, Phosphorus, Food Security, Phosphorus Paradox, Scarcity, Eutrophication, P-Efficiency, Phosphorus Cycling, N₂O -Emissions, Greenhouse-Gas-Emissions, Soil Health, Beneficial Microbes, Management Practices, Efficient Soil Microorganisms, Sustainable Agriculture, Environmentally-Friendly, Sustainable Crop Production, Rhizosphere Microbiome Engineering, Synthetic Microbiome, Plant Fertility, Microbial Biomass, Soil Microbiome, Microbial Diversity, Microbial Abundance, Abiotic Stress, Biotic Stress, Microbial Population, Composition, Soil Microbial Properties, Soil Microbial Community, Phospholipid Fatty Acid Analysis, Soil Biological Activity, Soil Microbial Community Life Strategies, Enzymatic Activities, PLFA, Plant Growth Promoting Rhizobacteria, PGPR, Root Exudates, Plant Growth Promotion, Symbiotic, P-Solubilization, Phytohormones, Arbuscular Mycorrhizae, Glomalin, Soil Aggregation, Soil Structure, GRSP, Soil Protein, Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Benefits Mycorrhizae, Glomalin-Related Soil Protein, Hyphal Wall, Secretion, Fungal Biodiversity, Fungal Functions, Fungus, Fungal Soil Protein, AMF, Aggregation, Soil Mycelium, Phosphate Solubilizing Fungi, Plant Microbe Interactions, Rhizosphere, Plant Biostimulants, Earthworm Services, Tillage, Pesticides, Ecosystem-Services, Lumbricidae, Organic Matter, Soil Organic Carbon, Below-Ground C-Translocation, C- Turnover, Carbon Sequestration, Carbon Response Function, Soil Organic Matter Dynamics, Microbial Biomass Carbon, Carbon Content, Sequestration Potential, Increased Organic Carbon, Humus, Soil Carbon Pools, Carbon Fix, 4 Per Mille, Soil Organic Carbon Storage, Sampling Depth, Soil Profile, Stratification, Intercropping , Legumes, Crop Rotation,

Nodulation, Crop Productivity, Agroecological Cropping Systems, Complementarity, Facilitation, Cover Crops, Catch Crops, Green Manure, Legacy Effect, Benefits, Cover Crop Management, No-Tillage, Tillage Intensity, Reduced Tillage, Conventional Tillage, Long Term Tillage, Tillage Effects, Conservation Agriculture, Soil Disturbance, Deep Ripping, Tillage Systems, Direct Drilling, Soil Water Holding Capacity, Water Infiltration, Water Infiltration Rate, Controlled Traffic Farming, Life Cycle Assessment, CTF, Permanent Traffic Lanes, Tramline Farming, Wide Span Vehicle, Gantry, Zero Traffic Regime, Soil Gaseous Emission, Energy Use, Soil Compaction Management, Wheel Effects, Economic Modelling, Precision Agriculture, Field Evaluation, Field Efficiency, Traffic Systems, Rainfall Use Efficiency.

Zudem wurde versucht möglichst aktuelle Artikel auszuwählen (2010 – 2023), um den aktuellsten Stand der wissenschaftlichen Forschung zu den entsprechenden Themen darzustellen sowie der insbesondere im Bereich der Mikroorganismen rasanten Entwicklung von Untersuchungsmethoden Rechnung zu tragen.

Bei der Recherche eines neues Themengebietes wurde zunächst explizit nach Review-Artikeln gesucht, um somit zunächst eine Übersicht über die Teilaspekte des Themengebietes zu erhalten. Anschließend wurde das Literaturverzeichnis dieser Review-Artikel nach relevanten Beiträgen durchsucht und dann mittels der bereits genannten wissenschaftlichen Suchmaschinen recherchiert.

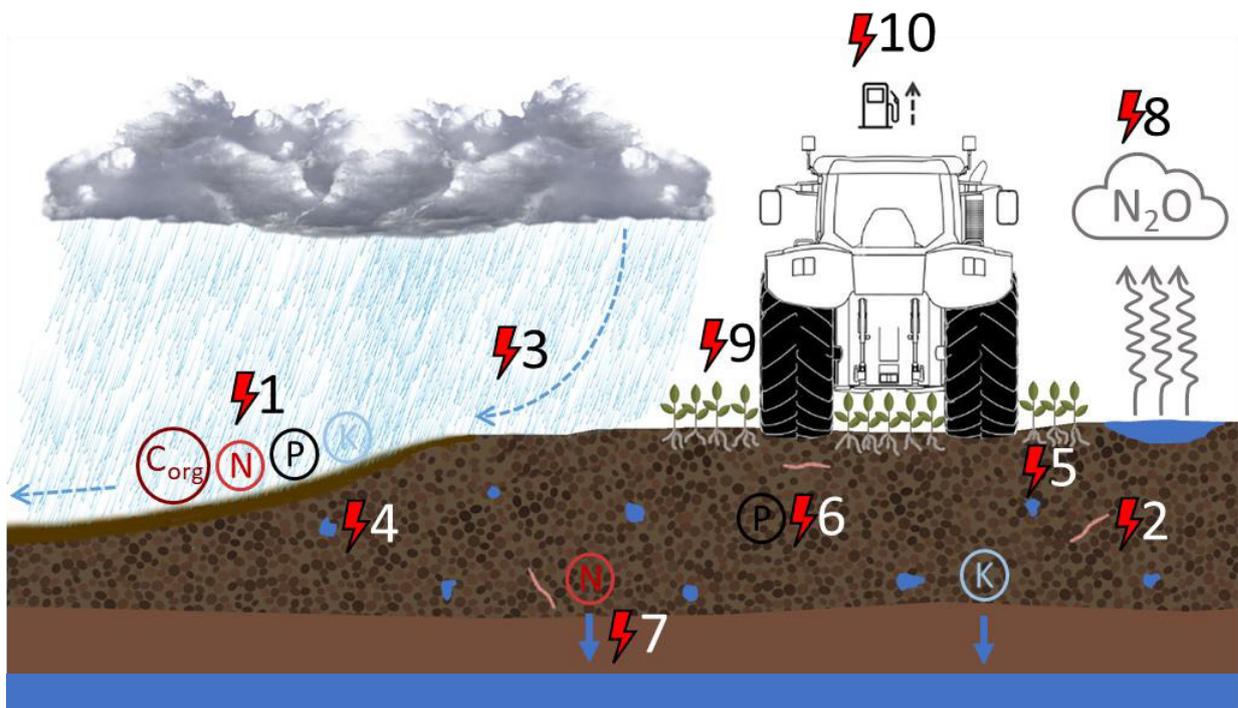
7 Ergebnisse der Untersuchung

Im Folgenden werden die zentralen Ergebnisse der Literaturrecherche vor dem Hintergrund der in Kapitel 6 beschriebenen Hauptforschungsfrage zusammenfassend dargestellt.

7.1 Auswirkungen von Bodenschadverdichtungen

In Anbetracht der stetig wachsenden Weltbevölkerung und der damit verbundenen steigenden Nachfrage nach Nahrungsmitteln sowie dem zunehmenden Druck einer nachhaltigeren Lebensmittelerzeugung, insbesondere in Industrienationen, ist die Reduzierung der zunehmenden Bodendegradation weltweit betrachtet eine zentrale Herausforderung um die erforderliche „nachhaltige Intensivierung“ zu bewältigen. So geht die Europäische Kommission davon aus, dass aktuell bereits 75 % der Landfläche der Erde geschädigt ist und über 90 % der Flächen bis 2050 degradiert werden könnten. Aktuell wird das 67-fache der Landfläche Belgiens jährlich degradiert (IPBES, 2018). Eine zentrale Ursache dafür ist die Bodenschadverdichtung, deren Auswirkungen in Abbildung 30 zusammenfassend dargestellt sind.

Abbildung 30: Auswirkungen von Bodenschadverdichtungen



- | | |
|--|---|
| ⚡1 = Bodenabtrag durch Erosion | ⚡6 = Reduzierte Nährstoffnutzungseffizienz |
| ⚡2 = Beeinträchtigt Bodenleben | ⚡7 = Nährstoffauswaschung |
| ⚡3 = Reduzierte Wasserinfiltration | ⚡8 = Anstieg Lachgasemissionen |
| ⚡4 = Weniger pflanzenverfügbares Wasser | ⚡9 = Geringere Erträge |
| ⚡5 = Eingeschränkte Wurzelentwicklung | ⚡10 = Erhöhter Energiebedarf |

Quelle: Eigene Darstellung

Bodenerosion

Insbesondere Wassererosion entsteht als Folge von Bodenschadverdichtungen, weil Niederschlagswasser auf Grund des reduzierten Porenvolumens und der erhöhten Lagerungsdichte nur langsam in den Boden einsickern kann (reduzierte Wasserinfiltration) und somit ein Großteil des Regenwassers oberflächlich abfließt und dabei Bodenpartikel mit sich reißt. Besonders problematisch ist, dass in den meisten Fällen der besonders fruchtbare Oberboden von Erosion betroffen ist, wodurch zum einen die Mächtigkeit des fruchtbaren Horizontes abnimmt und zum anderen auch wertvolle Nährstoffe und organischer Kohlenstoff verloren gehen. Gelangt das Erosionsmaterial in andere Ökosysteme wie z.B. Gewässer kann es dann durch die enthaltenen Nährstoffe zur Eutrophierung kommen.

Der jährliche Bodenabtrag in Südamerika wird auf 30-40 t/ha, in den USA auf 10-15 t/ha und in Europa auf 3,6 t/ha geschätzt, wobei die tolerierbare Bodenabtragsrate bei 1 t/ha/Jahr liegt. Demnach sind die genannten Werte des Bodenabtrages als irreversibel einzustufen.

Beeinträchtigtetes Bodenleben (insbesondere Regenwürmer)

Auch das Bodenleben kann durch Verdichtungszone n signifikant beeinträchtigt werden. Besonders bei Regenwürmern wurden nach schwerwiegenden Verdichtungsereignissen Abundanzeinbrüche von ungefähr 50-70 % festgestellt. Zum einen werden Regenwürmer durch die hohe Radlast zerquetscht und zum anderen werden verdichtete Zonen auf Grund des höheren Energieaufwandes bei ihrer Grabetätigkeit gemieden. Da Regenwürmer für die Entstehung von Bioporen zuständig sind, die maßgeblich zur Wasserinfiltration beitragen, kann davon ausgegangen werden, dass die Bodenabtragsraten in der Folge des verringerten Regenwurm vorkommens zusätzlich erhöht werden. Die Auswirkungen auf andere Bodenlebewesen, wie Pilze und Bakterien sind nicht eindeutig. Hier ist weitere Forschung notwendig.

Eingeschränktes Wurzelwachstum

Eine zentrale Auswirkung von Bodenschadverdichtungen mit pflanzenbaulichen als auch ökonomischen Folgen ist ein eingeschränktes Wurzelwachstum. Dafür verantwortlich ist einerseits der erhöhte Bodeneindringwiderstand in der Folge eines abnehmenden Porenvolumens und andererseits die starke Abnahme des Bodensauerstoffgehaltes durch eine verminderte Kontinuität der Poren, die von besonderer Bedeutung für die Leitfähigkeit von Wasser und Sauerstoff ist. Unter trockenen Witterungsverhältnissen ist der erhöhte Bodeneindringwiderstand die Hauptursache für ein eingeschränktes Wurzelwachstum, während der limitierende Faktor unter feuchten Bedingungen der geringe Sauerstoffgehalt im Boden ist (Staunässe). Ein schlecht entwickeltes Wurzelsystem wirkt sich ebenfalls auf die Bodenabtragsraten aus, da die Pflanzenwurzeln ein geringeres Bodenvolumen „fixieren“. Darüber hinaus wird die Aufnahme von knappen Ressourcen, wie Nährstoffen und Wasser beeinträchtigt, was sich letztlich auch auf den Ertrag auswirkt.

Ertragsreduzierungen

Wie bereits angedeutet, wirkt sich das eingeschränkte Wurzelwachstum letztlich auch auf den Ertrag aus. Bisher publizierte Veröffentlichungen gehen von Ertragsreduktionen im Bereich von 6-18,5 % aus, wobei diese Werte stark von der Witterung, Bodenart, Bodenbearbeitungspraktiken und der angebauten Kultur abhängen. Darüber hinaus geht mit der Ertragsreduktion ein verminderter Eintrag an organischem Pflanzenmaterial einher, was sich wiederum negativ auf die C_{org} -Gehalte des Bodens auswirkt.

Nährstoffnutzungseffizienz

Die Nährstoffnutzungseffizienz, also wie viel % der ausgebrachten Nährstoffe tatsächlich von der Pflanze aufgenommen werden, ist auf einem verdichteten Boden deutlich reduziert. So kann der erforderliche Stickstoffeinsatz auf einem verdichteten Boden gegenüber einem unverdichteten Boden um bis zu 100 % erhöht sein, um das gleiche Ertragsniveau zu erhalten. Dies ist einerseits auf die verminderte Wurzelentwicklung und das damit verbundene beschränkte Nährstoffaufnahmevermögen zurückzuführen und andererseits durch hohe Denitrifikationsverluste, wobei hohe Stickstoffverluste in Form von N_2O -Emissionen auftreten können, zu begründen. N_2O ist ein besonders klimarelevantes Treibhausgas mit einer ungefähr 300 mal höheren Treibhauswirkung als CO_2 . Auf Grund des beschränkten Nährstoffaufnahmevermögens kann auch die Phosphoraufnahme signifikant beeinträchtigt werden (bis zu 50 % weniger P-Aufnahme als auf einem unverdichteten Boden).

Energiebedarf

Auf Grund einer erhöhten Lagerungsdichte des Bodens kommt es zu einem erhöhten Eindringwiderstand von im Boden arbeitenden Werkzeugen. Zudem wird durch zusätzlich angewandte Maßnahmen wie eine Tiefenlockerung mit dem Versuch Verdichtungszone zu entfernen, zusätzlich Energie verbraucht. Auch der Verschleiß von Bodenbearbeitungswerkzeugen, die in einer Fahrspur laufen, ist signifikant erhöht. All diese Aspekte erhöhen den Energiebedarf in Folge einer Bodenschadverdichtung maßgeblich. Der erhöhte Energiebedarf wirkt sich zum einen ökonomisch in Form eines erhöhten Kraftstoff-

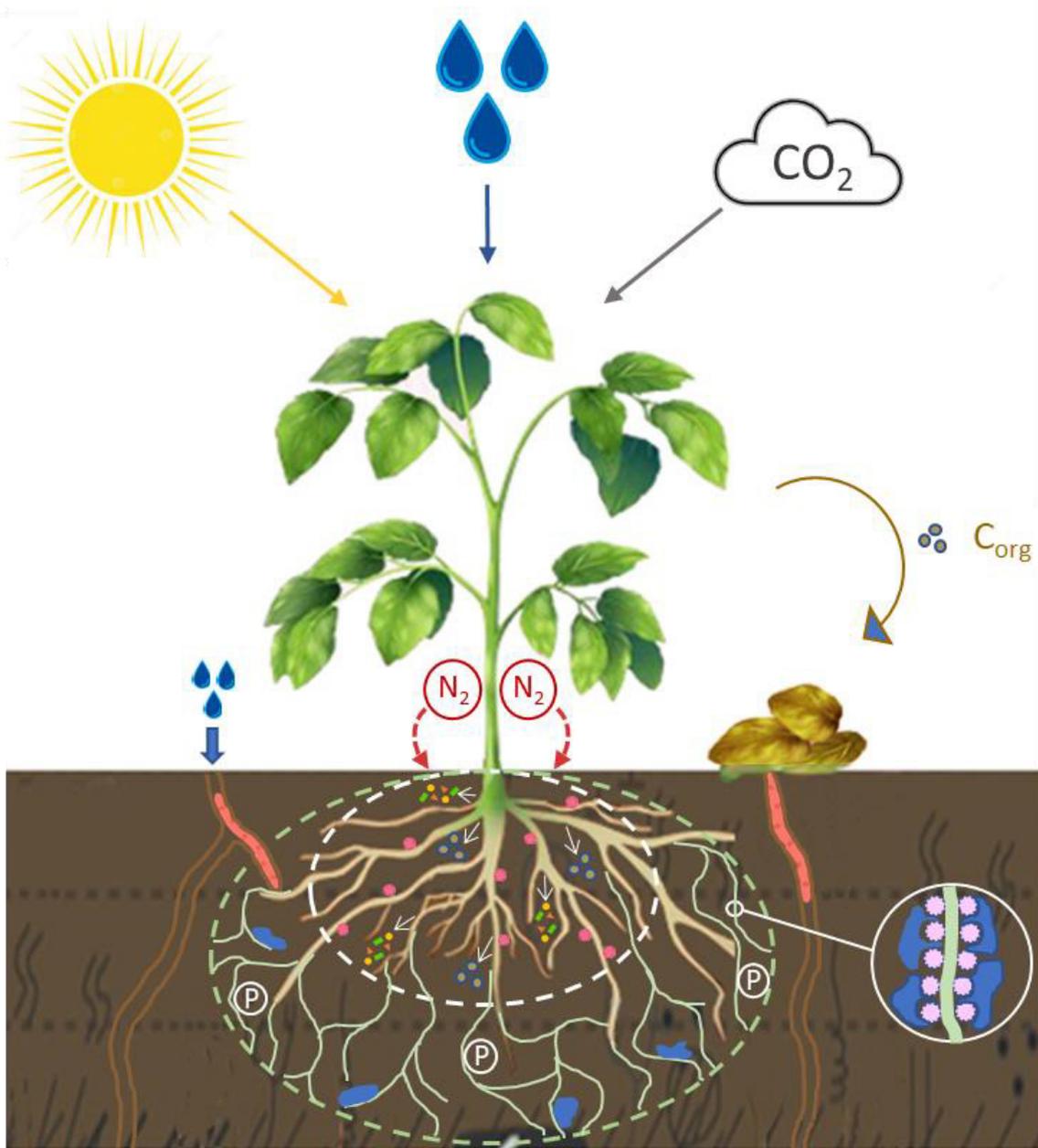
und Verschleißteilbedarfes auf und zum anderen ökologisch durch erhöhte CO₂-Emissionen, die von dem Anbausystem verursacht werden.

Insgesamt haben Bodenschadverdichtungen zum Teil drastische Auswirkungen auf die natürlichen Funktionen des Bodens und tragen maßgeblich zum Verlust fruchtbarer Ackerböden bei. Da das Regenerationspotenzial insbesondere im Unterboden äußerst gering ist, muss das Hauptaugenmerk beim Verdichtungsmanagement auf der bestmöglichen Vermeidung von Verdichtungen liegen.

7.2 Die zentralen Bestandteile und Prozesse eines gesunden Bodens

Die Minimierung des bereits beschriebenen und weit verbreiteten Prozesses der Bodendegradation ist ein zentraler Bestandteil einer langfristig tragfähigen Landwirtschaft um die natürliche Ressource „Boden“ und damit die Nahrungsgrundlage der Menschheit zu erhalten. Darüber hinaus ist jedoch auch ein Paradigmenwechsel erforderlich, um das Ziel einer nachhaltigen Intensivierung zu erreichen. Der Fokus sollte dabei auf der Förderung der natürlich im Boden ablaufenden Prozesse gelegt und der Einsatz von externen Betriebsmitteln reduziert werden. Hier kommt dem Konzept der Bodengesundheit eine besondere Bedeutung zu, indem Boden nicht einfach als Substrat zur maximal möglichen Lebensmittelerzeugung verstanden wird, sondern als ein lebender Organismus, der verschiedene Ökosystemfunktionen mit der Nahrungsmittelproduktion vereint und ein ganzheitliches Management verlangt. Abbildung 31 stellt die zentralen Komponenten und Prozesse eines gesunden Bodens zusammenfassend dar.

Abbildung 31: Schematische Darstellung eines gesunden Bodens



- | | | | |
|---|-----------------------|---|--------------------|
|  | = Niederschlagswasser |  | = Wurzelexsudate |
|  | = Sonnenenergie |  | = C _{org} |
|  | = PGPR |  | = Glomalin |
|  | = Hyphen von AM |  | = Bodenwasser |
|  | = Regenwürmer |  | = Bioporen |

Quelle: Eigene Darstellung

Eine hohe mikrobielle Diversität in einem Boden ist wünschenswert, da dadurch die gesamte Resilienz des Bodenlebens gesteigert wird und unterschiedliche MO unterschiedliche Funktionen wahrnehmen. Trotz dessen können drei Gruppen von Bodenlebewesen herausgestellt werden, die für eine nachhaltige und effiziente Pflanzenproduktion besonders bedeutsam sind. Dazu gehören:

- PGPR (Plant Growth Promoting Rhizobacteria)
- AM (Arbuskuläre Mykorrhiza)
- Regenwürmer

Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR)

PGPR siedeln sich in der unmittelbaren Umgebung von Pflanzenwurzeln an (Rhizosphäre), die in ihren physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften maßgeblich von den Wurzelexsudaten lebender Pflanzen beeinflusst wird. Bei den Wurzelexsudaten handelt es sich um diverse Verbindungen, die je nach Pflanzenart sowie biotischen und abiotischen Faktoren variieren und je nach Substanz spezifische MO anziehen.

Insgesamt können drei pflanzenwachstumsfördernde Prozesse unterschieden werden, die von PGPR initiiert werden:

- Produktion von Phytohormonen
- Symbiontische Beziehung von Pflanzen der Familie Fabaceae (Hülsenfrüchtler) und dem PGPR Bakterienstamm *Rhizobium* (Knöllchenbakterien)
- Lösung fixierter Phosphorformen

80 % der PGPR sind in der Lage Phytohormone zu synthetisieren, wobei sich bereits geringste Konzentrationen auf das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen auswirken können. Ein Beispiel ist die durch Phytohormone verursachte Senkung des Ehtylenlevels von Pflanzen, wodurch die Wurzelentwicklung verbessert sowie die Stresstoleranz erhöht wird.

Bei der symbiontischen Beziehung von Fabaceae (Leguminosen) und Rhizobien fixieren die PGPR atmosphärischen Stickstoff aus der Atmosphäre und wandeln diesen in pflanzenverfügbares NH_4^+ um. Im Gegenzug erhalten die Bakterien in Form von Wurzelexsudaten, die von der Pflanze ausgeschieden werden, kohlenstoffhaltige Verbindungen. Während der Vegetationszeit können dabei je nach Leguminosenart bis zu 150-200 kg N/ha fixiert werden.

Obwohl große Mengen Phosphor in den meisten Böden vorhanden sind, ist die Phosphorversorgung eines Bestandes eine große Herausforderung, da der Großteil fixiert vorliegt. PGPR können hier einen bedeutenden Beitrag zur Phosphorversorgung leisten, da sie durch die Synthese von organischen Säuren und Enzymen in der Lage sind fixierte Phosphorformen in pflanzenverfügbares HPO_4^{2-} und H_2PO_4^- umzuwandeln.

Arbuskuläre Mykorrhiza (AM)

Neben PGPR gehören AM zu den bedeutendsten MO, die es im Sinne eines gesunden Bodens zu fördern gilt. AM gehören zur Familie Glomeromycota, die etwa 150-200 Arten umfasst. Über 80 % der Pflanzen besitzen die Fähigkeit eine Symbiose mit AM einzugehen, wobei die Pilzhyphen in die Wurzeln der Pflanzen eindringen und diese anschließend mit mineralischen Nährstoffen versorgen, während die Pflanze, ähnlich der PGPR-Symbiose, kohlenstoffhaltige Verbindungen aus der Photosynthese an den Pilz liefert. Es wird geschätzt, dass bis zu 20 % der kohlenstoffhaltigen Verbindungen aus der Photosynthese an AM geliefert werden und sich der Pilz sogar zum Hauptorgan der Nährstoffaneignung entwickeln kann. Insgesamt können vier pflanzenwachstumsfördernde Aspekte identifiziert werden, die mit AM assoziiert sind:

- Verbesserte Aufnahme von knappen Ressourcen (Nährstoffe, Wasser)
- Verbesserung der Bodenstruktur durch Pilzhyphen (mechanische Stabilisierung)
- Verbesserung der Bodenstruktur durch Glomalinfreisetzung
- Lösung fixierter Phosphorformen

Der Hauptvorteil von AM ist auf die Erhöhung des nutzbaren Bodenvolumens zurückzuführen, welches für die zusätzliche Aufnahme von knappen Ressourcen, wie Nährstoffen und Wasser genutzt werden kann. Auf Grund der größeren Ausdehnung der

Pilzhyphen gegenüber den Pflanzenwurzeln kann das nutzbare Bodenvolumen um das bis zu 40-fache gesteigert werden.

Darüber hinaus sorgt die Verbindung von Bodenpartikeln mittels des weitverzweigten Pilzhyphennetzwerkes für eine größere Stabilität des Bodengefüges und einer verbesserten Bodenstruktur (mechanische Stabilisierung). Dieser Stabilisierungseffekt ist auch bei der Präsenz von Pflanzenwurzeln zu beobachten.

Eine besonders interessante Substanz im Hinblick auf die Bodenstruktur ist Glomalin. Dabei handelt es sich um ein Protein, welches ausschließlich in den Hyphenwänden von AM vorkommt und nach dem Absterben der Pilzhyphen im Boden freigesetzt wird. Auf Grund seiner hydrophoben Eigenschaften dient Glomalin als organisches Bindemittel, welches mineralische Partikel und OS Partikel verklebt und somit maßgeblich zur Bildung von stabilen Makroaggregaten beiträgt, in denen Wasser gespeichert werden kann.

Zudem wirken sich AM ebenso wie PGPR positiv auf die P-Verfügbarkeit aus, da fixierte Phosphorformen durch die Synthese und Ausscheidung von organischen Säuren und Enzymen in pflanzenverfügbare Formen umgewandelt werden.

Regenwürmer

Regenwürmer gelten als besonders wichtige Bodenlebewesen und ihre Anzahl sowie ihre Biomasse können Aufschluss über den Zustand eines Bodens liefern. Insgesamt werden drei verschiedene Regenwurmgruppen unterschieden: Anektische, endogäische und epigäische Regenwurmart, wobei sich die einzelnen Gruppen insbesondere in Bezug auf ihre Gangmorphologie unterscheiden. Die folgenden drei Hauptvorteile für Boden und Pflanzen werden mit dem Vorkommen von Regenwürmern in Verbindung gebracht:

- Verbesserung der Bodenstruktur durch Regenwurmausscheidungen
- Erhöhung der Wasserinfiltration durch Bioporen
- Einarbeitung und Stabilisierung von organischer Substanz

Die Verbesserung der Bodenstruktur erfolgt durch die Vermischung, Ausscheidung und Akkumulation von mineralischen und organischen Partikeln. In der Folge entstehen große stabile Bodenaggregaten, die deutlich resistenter gegenüber mechanischer Belastung sind durch z.B. Regentropfen.

Abhängig von der Regenwurmbiomasse können die Regenwurmausscheidungen zwischen 2-10 kg/m² und somit eine Bodenschicht von 5-25 mm ausmachen.

Hinsichtlich der Wasserinfiltration kommt den gebildeten Regenwurmgängen eine besondere Bedeutung zu. Diese fungieren als Bioporen, die mit ihrem großen Durchmesser und ihrer Durchgängigkeit zu einer signifikanten Erhöhung der Wasserinfiltration beitragen, wodurch der oberflächliche Wasserabfluss reduziert sowie der pflanzenverfügbare Wasseranteil erhöht wird. Untersuchungen haben ergeben, dass die Wasserinfiltrationsrate um 150 mm/h je 100g Regenwurmbiomasse/m² ansteigen kann.

Da Regenwürmer organisches Material als Hauptfutterquelle nutzen, sorgen sie bei der Nahrungsaufnahme an der Bodenoberfläche und dem anschließenden Ausscheiden in tieferen Bodenschichten für die Einarbeitung des Materials und zum anderen für die Stabilisierung der organischen Substanz. Dieser Stabilisierungsprozess kann sowohl durch den Eintrag in tiefere Bodenschichten erklärt werden, in denen die mikrobielle Aktivität und die damit einhergehende Umsatzrate geringer ist als auch durch die ausgeschiedenen organisch-mineralischen Komplexe, die deutlich stabiler gegenüber dem mikrobiellen Abbau sind.

C_{org}

Neben den bereits dargestellten Bodenlebewesen ist der C_{org}-Gehalt des Bodens ein weiterer zentraler Indikator für einen gesunden Boden. Für den Eintrag von C_{org} in den Boden kommt Pflanzen eine besondere Bedeutung zu: Über die Reaktion der Photosynthese, bei der Wasser und CO₂ mittels Sonnenenergie in Kohlenhydrate und O₂ umgewandelt werden, wird C_{org} auf zwei Wegen in den Boden eingetragen. Zum einen über pflanzliches Blatt-, Spross- und Wurzelmaterial welches als abgestorbenes pflanzliches Material zur Erhöhung der OS-Gehalte beiträgt (Decomposition Pathway) und zum anderen über die Wurzelexsudate lebender Pflanzen, welche maßgeblich aus C-haltigen Substanzen bestehen (Liquid Carbon Pathway). Die Bedeutung der Erhöhung der C_{org}-Gehalte ergibt sich aus den vielfältigen positiven Effekten, die mit der organischen Bodensubstanz assoziiert sind. Dazu zählen die folgenden Aspekte:

Verbesserte Bodenstruktur

- Abnahme Lagerungsdichte
- Zunahme Porenvolumen
- Zunahme Aggregatstabilität

Verbesserte Wasserversorgung

- Erhöhung Wasserinfiltration
- Erhöhung Wasserspeicherkapazität

Verbessertes Nährstoffangebot

- Nachlieferung von Makro- und Mikronährstoffen nach Mineralisation

Förderung Bodenleben

- Erhöhung der mikrobiellen Biomasse, die C_{org} als Substrat nutzen
- Zunahme der Regenwurmpopulation, die C_{org} als Hauptfutterquelle nutzen

Zunahme Ertrag

- Ertragszuwachs auf Grund einer verbesserten Bodenstruktur sowie Nährstoff- und Wasserversorgung

Die Anhebung der Humusgehalte auf ein standorttypisches Optimum verspricht dabei die größten Erfolge für eine langfristige C-Sequestrierung. Neben den zahlreichen pflanzenbaulichen sowie monetären Vorteilen, die mit der Erhöhung der OS einhergehen, kann ein Absinken der C_{org} -Gehalte im Wurzelbereich auf unter 1,5-2 % andererseits zu einer starken Beeinträchtigung wichtiger Bodenfunktionen, wie z.B. der Bodenbelüftung oder der Wasser- und Nährstoffversorgung führen. Dementsprechend sind Maßnahmen zum Humusaufbau nicht als optional, sondern als unabdingbarer Teil eines nachhaltigen und langfristig tragfähigen Landmanagements anzusehen.

Insgesamt kann Abbildung 31 als selbstverstärkender Kreislauf betrachtet werden. Die Fixierung und der Eintrag von C über die Photosynthese ist dabei der Ausgangspunkt. Durch den C_{org} -Eintrag mittels Pflanzenmaterial und Wurzelexsudaten wird die Diversität und die Abundanz der Bodenlebewesen gefördert, die C_{org} als Nahrungsquelle nutzen. Auf Grund einer verbesserten Bodenstruktur sowie einer optimalen Wasser- und Nährstoffversorgung durch die Ausweitung des zur Ressourcenaufnahme nutzbaren Bodenvolumens und der

Produktion von Phytohormonen, Enzymen, Glomalin und Bioporen wird das Pflanzen- sowie Wurzelwachstum gefördert. In der Folge wird die Photosyntheserate erhöht und größere Mengen C_{org} in Form von Pflanzenmaterial und Wurzelexsudaten werden in den Boden eingetragen. Der Kreislauf beginnt von vorne und die dargestellten Effekte verstärken sich. Letztlich können höhere Erträge bei reduziertem Einsatz von externen Betriebsmitteln erwirtschaftet werden und die potenzielle C-Sequestrierung wird gefördert.

7.3 Der erforderliche Paradigmenwechsel zur Umsetzung der nachhaltigen Intensivierung

Darüber hinaus ist jedoch auch ein Paradigmenwechsel erforderlich, um das Ziel einer nachhaltigen Intensivierung zu erreichen. Der Fokus sollte dabei auf der Förderung der natürlich im Boden ablaufenden Prozesse gelegt und der Einsatz von externen Betriebsmitteln reduziert werden. Hier kommt dem Konzept der Bodengesundheit eine besondere Bedeutung zu, indem Boden nicht einfach als Substrat zur maximal möglichen Lebensmittelerzeugung verstanden wird, sondern als ein lebender Organismus, der verschiedene Ökosystemfunktionen mit der Nahrungsmittelproduktion vereint und ein ganzheitliches Management verlangt.

Auf Grund der bereits beschriebenen Zusammenhänge zwischen Bodenschadverdichtungen, dem Pflanzenwachstum und dem Bodenleben können drei Maßnahmen herausgestellt werden, die das Fundament einer nachhaltigeren und zugleich produktiveren Landbewirtschaftung bilden. Dazu zählen ZF-Anbau, Direktsaat und CTF (Abbildung 32).

Abbildung 32: Die drei zentralen Maßnahmen zur Umsetzung der nachhaltigen Intensivierung



Quelle: Eigene Darstellung

Die Bedeutung dieser Maßnahmen ergibt sich aus den signifikanten agronomischen sowie ökonomischen Vorteilen, die mit deren Umsetzung assoziiert sind, sowie der verglichen mit anderen Maßnahmen umfassenden Wirkung auf das gesamte Anbausystem.

ZF-Anbau

In Anbetracht der Tatsache, dass circa 50 % der weltweiten Ackerfläche jeden Winter unbewachsen sind, kommt dem ZF-Anbau zur Reduzierung der zahlreichen Umweltauswirkungen von temporären Brachen eine besondere Bedeutung zu. Insgesamt ist jede zusätzliche Begrünung als positiv zu bewerten, jedoch bieten ZF-Mischungen einige Vorteile gegenüber Reinsaaten. So konnte festgestellt werden, dass die Pflanzendiversität eng mit der mikrobiellen Diversität verbunden ist. Einerseits fördern unterschiedliche Pflanzenarten durch die pflanzenartspezifischen Wurzelexsudate bestimmte MO-Gruppen und andererseits kommt es zur Entstehung von heterogenen Lebensräumen, die von unterschiedlichen MO besetzt werden. Darüber hinaus nutzen verschiedene Pflanzenarten z.B. in Abhängigkeit des Wurzelsystems ([homorhiz](#) vs. [allorhiz](#)) unterschiedliche Ressourcenpools, was zu einer optimierten Ressourcennutzung führt.

Bei der Wahl der ZF-Komponenten gibt es unterschiedliche agronomische Ziele. Hinsichtlich der Förderung des Bodenlebens sollten ZF-Mischungen insbesondere Leguminosen sowie C3-Pflanzen beinhalten. Während Leguminosen durch die symbiontische Beziehung zu Rhizobien und der damit verbundenen N-anreichernden Wirkung vorwiegend PGPR und Nicht-AM-Pilze fördern, begünstigen C3-Gräser wie Hafer oder Roggen die Entwicklung von AM und deren Hyphensystem. Pflanzen aus der Familie der Brassicaceae (z.B. Raps, Rettich, Senf, Kohl) sind aus Sicht der Bodenbiologie eher ungeeignet, da sie nicht mykorrhizal sind und es zur Ausscheidung von antipilzlichen Substanzen kommen kann.

Im Hinblick auf die Ressourcennutzung sowie Bodenstruktur sollten flachwurzelnde Pflanzen mit hohem Feinwurzelanteil (z.B. Weidelgras) mit tiefwurzelnden Pflanzen kombiniert werden (z.B. Wicke oder Luzerne). Pflanzen mit Pfahlwurzeln sind sogar in der Lage verdichtete Zonen in tieferen Bodenschichten durch das Hindurchwachsen aufzulockern und damit für eine „biogene Bodenlockerung“ zu sorgen. Durch die Kombination unterschiedlicher Wurzelsysteme kann ein deutlich größeres Bodenvolumen zur Ressourcenaufnahme genutzt werden und die [intra- sowie interspezifische Konkurrenz](#) zwischen den Pflanzen wird reduziert.

Im Sinne des Erosionsschutzes sowie einer optimierten Befahrbarkeit ist die Nutzung von winterharten und wenn möglich sogar mehrjährigen Pflanzenarten empfehlenswert, um das kurze Zeitfenster unbewachsenen Bodens nach Absterben der ZF im Winter zu vermeiden und das Bodengefüge für die Befahrbarkeit durch die mechanische Stabilisierung mittels der Pflanzenwurzeln zu optimieren. Insbesondere in Fruchtfolgen mit einem intensiven Anbau von Sommerkulturen mit langsamer Jugendentwicklung, wie z.B. Mais können winterharte und [perennierende](#) Kulturen vorteilhaft sein.

Bei der Integration ein- oder mehrjähriger Begleitpflanzen in ein Anbausystem spricht man von Intercropping, wobei die Fruchtfolge aufgelockert wird, ohne auf den Anbau wirtschaftlich wichtiger Hauptkulturen zu verzichten. Wie auch bei der Zusammenstellung von ZF-Mischungen, eignen sich Pflanzenarten für ein Intercroppingsystem, welche nicht in direkter Konkurrenz um knappe Ressourcen wie Raum, Nährstoffe, Wasser oder Sonnenlicht stehen.

Zur Erhöhung des Erosionsschutzes und der Verbesserung der Befahrbarkeit in einem Maisanbausystem eignen sich beispielsweise Kleearten als Begleitfrucht sehr gut.

Darüber hinaus sind mehrjährige Pflanzenarten hinsichtlich der C_{org} -Gehalte besonders empfehlenswert, da dem Boden in Form von Wurzelexsudaten sowie absterbendem Spross- und Wurzelmaterial ständig organisches Material zugeführt wird. Zudem werden die Mineralisationsverluste in Form von CO_2 durch die erhöhte Bodenruhe verringert. Auch das C/N-Verhältnis sowie die Ligningehalte entscheiden über den Mineralisationsverlauf. Hier zeichnen sich Gräser gegenüber Leguminosen auf Grund der weiteren C/N-Verhältnisse sowie der höheren Ligningehalte durch einen langsameren Mineralisationsverlauf aus. Außerdem bilden Gräser in den meisten Fällen eine höhere Menge ober- und unterirdisches Pflanzenmaterial, was ebenfalls zu einem Anstieg der C_{org} -Gehalte beitragen kann.

Je nach Zielsetzung muss standortspezifisch entschieden werden, wie genau die ZF-Mischung zusammengesetzt ist. Unabhängig von der Zielsetzung und dem Standort ist jedoch der Grundsatz, dass es sich um eine möglichst diverse Mischung handeln sollte, um das volle Potenzial des ZF-Anbaus zu nutzen.

Direktsaat

Je nach Intensität der Bodenbearbeitung kann es zu schwerwiegenden Auswirkungen auf die Bodenlebewesen kommen. Insbesondere AM und Regenwürmer als besonders bedeutsame Vertreter der Bodenbiologie werden durch Bodenbearbeitungsgänge beeinträchtigt. AM werden hauptsächlich durch das mechanische Durchtrennen von ausgebildeten Hyphen und dem damit verbundenen Einbruch der Nährstoffversorgung geschädigt (40-60 % weniger AM unter konventioneller BB). Auf der anderen Seite fördert ausbleibende Bodenbearbeitung und die damit auf der Bodenoberfläche verbleibende Mulchschicht die AM Besiedlung und das Wachstum durch ein feuchteres Mikroklima mit geringeren Temperaturextrema. Auf Grund des bereits dargestellten Zusammenhangs zwischen AM Hyphen und der Glomalinkonzentration, kann davon ausgegangen werden, dass Direktsaatböden auch deutlich höhere Glomalingehalte und damit verbunden eine höhere Aggregatstabilität aufweisen.

Regenwürmer werden vorwiegend durch die mechanische Beschädigung sowie das plötzliche Freilegen nach wendender Bodenbearbeitung beeinträchtigt. So wurde nach einem 5-jährigen Pflugeinsatz eine um 70 % reduzierte Regenwurmbiomasse festgestellt. Da auf Grund ihres Lebensraumes besonders anektische und epigäische Regenwurmarten von intensiver Bodenbearbeitung betroffen sind, wirkt sich dies auch signifikant auf die Anzahl und die Durchgängigkeit von Bioporen aus, die wie bereits dargestellt von großer Bedeutung für die Wasserinfiltrationsleistung eines Bodens sind.

Da die Diversität des Bodenlebens eng mit der Verfügbarkeit von Mikrohabitaten verknüpft ist und es bei intensiver BB zu einer Homogenisierung von bodenphysikalischen- und chemischen Parametern über den Bearbeitungshorizont kommt, kann zudem davon ausgegangen werden, dass auch das Vorkommen von Mikrohabitaten und die damit verbundene mikrobielle Diversität verringert wird.

In Bezug auf die C_{org} -Gehalte des Bodens führt die Umstellung auf Direktsaat zu einer ausgeprägten Stratifizierung von C_{org} an der Bodenoberfläche mit hohen C_{org} -Gehalten in der Bodenschicht 0-15 cm und stark abnehmenden C_{org} -Gehalten in den darunter liegenden Bodenhorizonten. Ob es unter Direktsaat zu einem Netto C-Eintrag gegenüber konventioneller BB kommt, hängt zum einen von betrachteten Bodenhorizont ab und zum anderen von der Frage, ob die C_{org} -Anreicherung in der oberen Bodenschicht die C_{org} -Abnahme in tieferen Bodenschichten kompensieren kann.

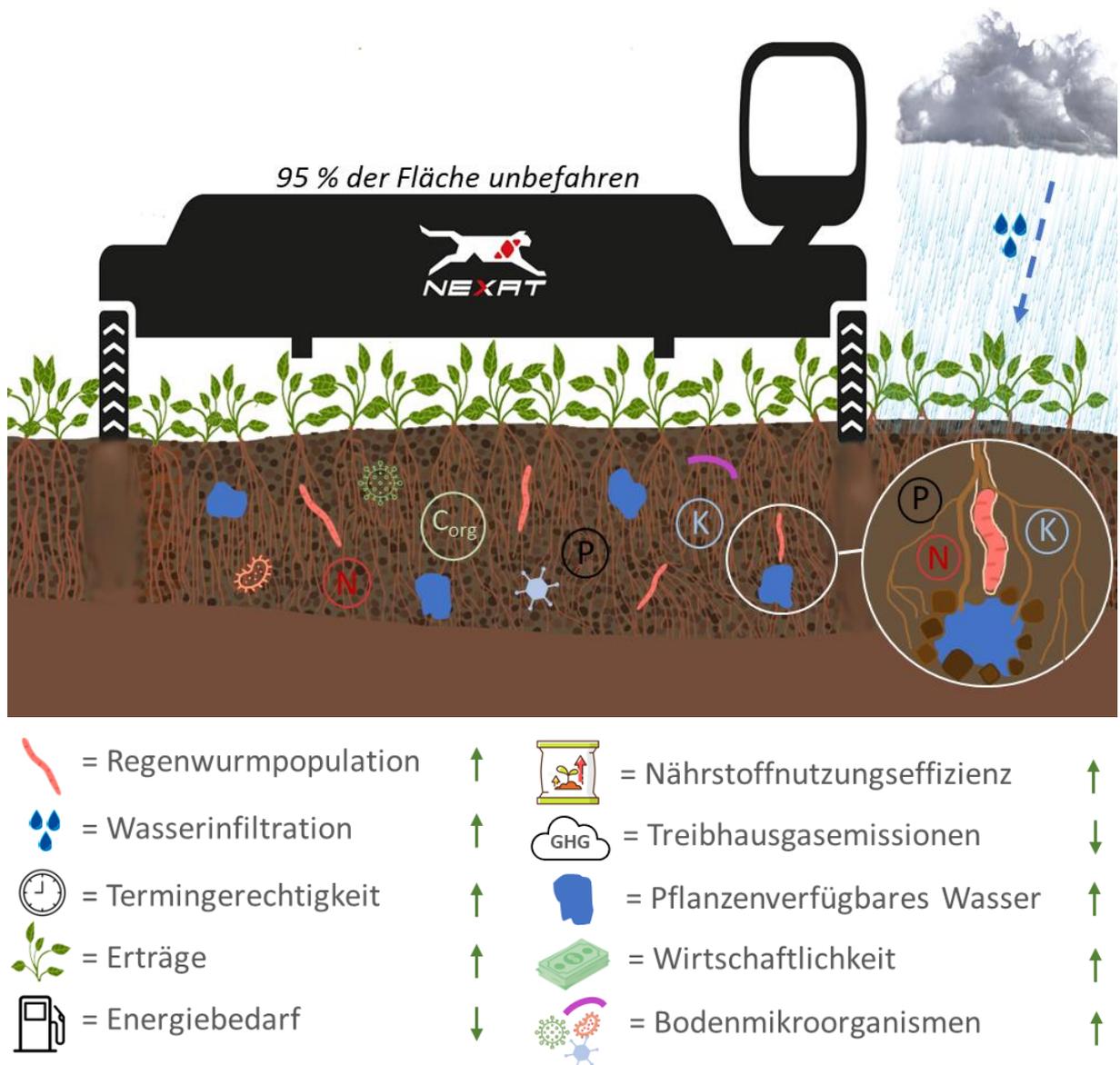
Trotz des variablen Gesamteffektes, kommt der C_{org} -Anreicherung an der Bodenoberfläche aus pflanzenbaulicher und ökologischer Perspektive eine besondere Bedeutung zu. So sorgt die Mulchschicht an der Bodenoberfläche für stark reduzierte Erosionsraten, verringerte Nährstoffeinträge in natürliche Ökosysteme, sowie ein feuchteres und gemäßigteres Mikroklima.

Zwar ist die Umsetzung jeder einzelnen Maßnahme, wie ZF-Anbau oder Direktsaat als vorteilhaft gegenüber des Status quos anzusehen, jedoch kann das volle Potenzial erst durch eine Kombination dieser Maßnahmen generiert werden. Das übergeordnete Ziel sollte dabei die Nachahmung von natürlichen Ökosystemen sein. Diese sind durch dauerhafte Bodenbedeckung, Zufuhr großer Mengen organischen Kohlenstoffs, einer hohen Pflanzendiversität und ausbleibendem Bodeneingriff gekennzeichnet. All diese Aspekte sind nur durch eine Kombination von ZF-Anbau und Umstellung auf Direktsaat zu erreichen, woraus sich die Bedeutung für einen ganzheitlichen Managementansatz ergibt, der auf die Kombination einzelner Maßnahmen abzielt, um die größtmöglichen Vorteile zu realisieren. Während ZF-Anbau auf eine aktive Erhöhung der Humusgehalte durch eine zusätzliche Periode der C-Assimilation und dem damit verbundenen zusätzlichen C_{org} -Eintrag (Pflanzenmaterial + Wurzelexsudate) abzielt, ist das primäre Ziel von ausbleibender BB die Mineralisierung des im Boden befindlichen C_{org} zu reduzieren.

CTF

Auf Grund der zahlreichen negativen Effekte, die mit der Entstehung von verdichteten Zonen einhergehen, muss der Hauptfokus des Verdichtungsmanagements auf der bestmöglichen Vermeidung von Bodenschadverdichtungen liegen. Insbesondere auf Grund der Tatsache, dass die Beseitigung von Verdichtungen äußerst schwierig ist und sich angewandte Maßnahmen zum Teil sogar kontraproduktiv auswirken können (Bsp. Tiefenlockerung). Deshalb ist die Etablierung von CTF eine zentrale Voraussetzung für eine nachhaltige Landwirtschaft. Das NEXAT Widespan-System, welches im Folgenden nur noch als WS-CTF abgekürzt wird, ist die optimale Umsetzung eines CTF-Systems, da hier die unbefahrene Fläche auf $> 95 \%$ ansteigt. Durch den äußerst niedrigen Spurflächenanteil, können auch die mit der Umstellung auf ein CTF-System assoziierten Vorteile maximiert werden. Abbildung 33 fasst diese zusammen:

Abbildung 33: Vorteile des NEXAT Widespan-CTF-Systems



Quelle: Eigene Darstellung

So hat WS-CTF einen äußerst positiven Effekt auf die Regenwurmpopulation und die damit korrelierte Wasserinfiltration des Bodens. In Anbetracht des fortschreitenden Klimawandels und einer sich verändernden Wetterlage hinsichtlich Niederschlagsmenge und -verteilung kann davon ausgegangen werden, dass die Wasserinfiltrationsleistung eines Bodens in Zukunft immer wichtiger wird, um einerseits Bodenabtrag in Folge von Extremwetterereignissen zu reduzieren und andererseits die Wasserversorgung in Trockenperioden zu verbessern. Darüber hinaus übernehmen Regenwürmer die Einarbeitung von Ernte- und Wurzelrückständen sowie anderen pflanzlichen Materialien,

was insbesondere in Direktsaatsystemen in denen keine maschinelle Bodenbearbeitung vorgesehen ist, von besonderer Bedeutung für ein funktionierendes No-Till-System ist. Die Lupenansicht in Abbildung 33 zeigt einen weiteren Vorteil einer gesunden Regenwurmpopulation: Pflanzenwurzeln nutzen die durchgängigen Regenwurmgänge, um ohne großen Energieaufwand in die Tiefe zu wachsen und somit auch in tieferen Bodenschichten knappe Ressourcen, wie Wasser und Nährstoffe aufnehmen zu können.

Vor dem Hintergrund sich verändernder politischer als auch gesellschaftlicher Rahmenbedingungen in Hinblick auf den Einsatz von externen Betriebsmitteln wie beispielsweise Mineraldünger oder Pflanzenschutzmittel ist die zunehmende Termingerechtigkeit, mit der anfallende landwirtschaftliche Arbeiten durchgeführt werden können, ein besonderer Vorteil des WS-CTF. Auf Grund einer verbesserten Befahrbarkeit können externe Betriebsmittel zum optimalen Zeitpunkt ausgebracht werden und somit die Aufwandmenge von Mineraldüngern, Pflanzenschutzmitteln und Saatgut bedeutend reduziert werden. So kann davon ausgegangen werden, dass beispielsweise die N-Nutzungseffizienz, die aktuell nur bei etwa 30-40 % liegt, durch die verbesserte Synchronisation von Nährstoffbedarf und Nährstoffbereitstellung deutlich erhöht werden kann. In Anbetracht bereits etablierter Obergrenzen für den Einsatz von Düngemitteln ist die Steigerung der Nutzungseffizienz eine zentrale Voraussetzung, um mittel- und langfristige Ertragseinbußen zu vermeiden.

Darüber hinaus bietet WS-CTF ein erhebliches Energieeinsparpotential von 70 – 90 % durch den geringeren spezifischen Bodenwiderstand für alle im Boden arbeitenden Werkzeuge als auch den geringeren Rollwiderstand auf den stark verdichteten permanenten Fahrgassen. Zudem entfällt mit dem ausbleibenden Befahren der Wachstumszone auch eine wichtige Motivation für eine tiefe Bodenbearbeitung. Die Umstellung auf (WS-) CTF kann sogar als zentrale Voraussetzung für ein langfristig erfolgreiches Direktsaatsystem angesehen werden, da einmal entstandene Gefügeschäden noch schwieriger beseitigt werden können als in einem konventionellen System. So kann das Energieeinsparpotential durch die Kombination eines ohnehin energiesparenden Anbausystems ohne BB in Kombination mit WS-CTF weiter erhöht werden. Zudem können zusätzliche Arbeitsgänge wie die Aussaat einer ZF in Bezug auf die Arbeitserledigungskosten relativ kostengünstig durchgeführt werden.

Auf Grund des reduzierten Betriebsmitteleinsatzes und Energieaufwandes können in einem WS-CTF-System auch geringere Treibhausgasemissionen verzeichnet werden. Insbesondere die Emissionen von CO₂, CH₄, N₂O und NH₃ können zum Teil erheblich vermindert werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass Produkte aus emissionsärmeren Anbausystemen in naher Zukunft zunächst vermehrt nachgefragt werden und schließlich zum Standard werden. Dies ist auf ein wachsendes Verbraucherbewusstsein und eine damit verbundene Anpassung der gesamten Lebensmittelwertschöpfungskette zurückzuführen, um auf die sich wandelnden Nachfragemuster der Konsumenten reagieren zu können. Die Umstellung auf WS-CTF kann somit als wichtige Anpassungsmaßnahme für landwirtschaftliche Betriebe gesehen werden, um auf die sich verändernden Nachfragebedingungen zu reagieren und damit mittel- und langfristig handlungsfähig zu bleiben.

Sowohl die verbesserte Termingerechtigkeit als auch die optimierte Bodenstruktur durch das ausbleibende Überrollen der Pflanzenwachstumszone (z.B. erhöhte Porosität, bessere Wasserinfiltration etc.) können als Hauptgründe für zum Teil signifikante Ertragszuwächse (3- größer 35 %) identifiziert werden. Da sich der Ertrags- und damit auch der Umsatzzuwachs proportional zur Reduktion der befahrenen Fläche verhält, ist dieser bei WS-CTF mit dem äußerst geringen Spurflächenanteil gegenüber einem CTF-System mit konventioneller Technik sogar noch größer. Darüber hinaus kann ein großer Teil der variablen Kosten verringert werden, was letztlich eine deutliche Gewinnsteigerung verspricht.

Insgesamt können Bodenschadverdichtungen durch den Einsatz des NEXAT WS-CTF auf ein minimales Maß begrenzt werden, wodurch die damit einhergehende Bodendegradation maßgeblich reduziert wird und die Ressource Boden als unsere Lebensgrundlage erhalten bleibt. Auf Grund der ausbleibenden Verdichtung werden wichtige Bodenlebewesen wie PGPR, AM und Regenwürmer nicht beeinträchtigt und die natürlichen Prozesse und Funktionen des Bodens werden erhalten. Durch die Integration pflanzenbaulicher Maßnahmen, wie dem Anbau diverser ZF-Mischungen und Direktsaat können externe Betriebsmittel, wie Mineraldünger, Pflanzenschutzmittel und Treibstoff weiter reduziert und die Bodengesundheit gefördert werden.

Das NEXAT WS-CTF bietet mit dem äußerst geringen Spurflächenanteil und den damit verbundenen Vorteilen (z.B. optimierte Termingerechtigkeit) die bestmögliche Umsetzung der pflanzenbaulichen Maßnahmen und kann deshalb in Verbindung mit den dargestellten agronomischen Ansätzen als optimales System zur nachhaltigen Intensivierung angesehen werden.

8 Diskussion

Im Zuge dieser Untersuchung wurden die grundlegenden Prinzipien der Regenerativen Landwirtschaft durch die Analyse von wissenschaftlichen Artikeln untersucht und versucht allgemein gültige Handlungsempfehlungen abzuleiten, die für die Lösung des eingangs beschriebenen Zielkonfliktes der nachhaltigen Intensivierung von großer Bedeutung sind. Zudem wurde betrachtet, wie das NEXAT WS-CTF-System zur Umsetzung einer nachhaltigeren und produktiveren Landbewirtschaftung beitragen kann.

Der Anbau von diversen ZF-Mischungen ist ein wichtiger Baustein zur Förderung der Bodengesundheit und damit letztlich zu einer nachhaltigen Steigerung der Nahrungsmittelproduktion. Dabei müssen jedoch agronomische Restriktionen beachtet werden, die sich aus der Fruchtfolgegestaltung ergeben. So sollte der Leguminosenanteil in der Fruchtfolge 25-35 % auf Grund von phytosanitären Aspekten nicht übersteigen, was den empfohlenen Einsatz von Leguminosen in der ZF-Mischung bei intensivem Anbau von Leguminosen als Hauptkultur (z.B. Sojabohnen) erschwert (KOLBE, 2008: 2). Im Hinblick auf das Bodenleben und den Erosionsschutz sind winterharte ZF-Komponenten auf Grund der dauerhaften Wurzelausscheidungen und Bodenbedeckung zwar als vorteilhaft anzusehen, jedoch ist das Management der ZF im darauffolgenden Frühjahr deutlich anspruchsvoller und eine vollständige Termination ist prinzipiell nur durch die Ausbringung eines Totalherbizides möglich. Auf Grund der Tatsache, dass der Totalherbizideinsatz beispielsweise in Ländern Europas bereits stark eingeschränkt wird und zum Ende des Jahres 2023 komplett auslaufen soll, wird die Beseitigung einer winterharten ZF zunehmend zur Herausforderung. Darüber hinaus kommt auch der Wahl des richtigen Terminationszeitpunktes einer winterharten ZF eine besondere Bedeutung zu. Im Falle eines niederschlagreichen Frühjahrs sollte die Beseitigung so spät wie möglich vor der Etablierung der Sommerkultur erfolgen, um über die Transpiration Wasser aus dem Boden zu ziehen, während die Termination im Falle eines trockenen Frühjahrs früher erfolgen sollte, um pflanzenverfügbares Wasser für die Folgekultur zu sparen. Insgesamt muss die Aussaattechnik, der Saatzeitpunkt und die ZF-Komponentenwahl in Abhängigkeit der Standort- und Klimabedingungen, wie z.B. Fruchtfolge, Niederschlagsmenge, Niederschlagsverteilung und Temperaturen gewählt werden, wobei der Grundsatz der Diversität immer bestmöglich berücksichtigt werden sollte.

Die Direktsaat, mit der Anhäufung von organischem Material an der Bodenoberfläche, bietet zahlreiche Vorteile hinsichtlich der Reduktion von Bodendegradationsprozessen. Trotz dessen bringt dieses Anbausystem auch Herausforderungen in Bezug auf die Unkrautkontrolle, die Schädlingsbekämpfung sowie die Fruchtfolgegestaltung mit sich. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich das Unkrautspektrum bei der Umstellung von konventioneller BB auf Direktsaat zunächst verändert, da der Bodeneingriff auf die Saattiefe reduziert wird. Durch den damit reduzierten Lichtreiz bleibt ein größerer Teil der im Boden befindlichen Samen dormant, also keimt nicht, und das Unkrautspektrum verschiebt sich hin zu flachkeimenden Arten.

ZF und Untersaaten können zwar einen wichtigen Beitrag zur Unkrautunterdrückung leisten, dennoch ist der chemische Pflanzenschutz in Form von Totalherbiziden ein zentraler Bestandteil eines Anbausystems ohne BB. Auf Grund der bereits dargestellten Problematik hinsichtlich der zunehmenden Einschränkung des chemischen Pflanzenschutzes in manchen Teilen der Welt wird das Unkrautmanagement in Direktsaatsystemen immer mehr zur Herausforderung. Darüber hinaus können Alternativen, wie die mechanische Unkrautbekämpfung mittels Hackgerät oder Striegel nicht genutzt werden, da es sich dabei streng genommen auch um einen flachen Bodenbearbeitungsgang handelt. Dementsprechend sollte der Hauptfokus des Unkrautmanagements in einem Direktsaatsystem auf vorbeugenden pflanzenbaulichen Maßnahmen, wie z.B. einer erweiterten Fruchtfolge liegen. Hier muss jedoch erwähnt werden, dass die mögliche Fruchtfolgeerweiterung stark von den ökonomischen Rahmenbedingungen abhängt. So ist ein zentrales Problem, dass beispielsweise Leguminosen als Hauptkultur finanziell betrachtet häufig nicht konkurrenzfähig sind gegenüber Getreidekulturen, was deren Anbau stark ausbremst (z.B. in Europa). Für die Gestaltung erweiterter Fruchtfolgen müssen also zum einen Vermarktungsmöglichkeiten für diverse Kulturen geschaffen werden und zum anderen könnten gezielte Subventionsprogramme die Anbauwürdigkeit verschiedener Kulturen erhöhen (Vergleich [Eiweißpflanzenstrategie des BMEL](#)).

Eine weitere Herausforderung in Direktsaatsystemen ist das Schädlingsmanagement. Auf Grund des auf der Bodenoberfläche verbleibenden Pflanzenmaterials in Form von z.B. Ernterückständen finden Mäuse und Schnecken optimale Bedingungen, um sich fortzupflanzen. In der Folge können junge Pflanzen durch die stark ansteigende Mäuse- und Schneckenpopulation und den damit einhergehenden Fraßschäden erheblich in ihrer Photosyntheseleistung beeinträchtigt werden.

Abhilfe kann hier nur die Förderung von Antagonisten, wie beispielsweise Greifvögeln, bieten oder die chemische Bekämpfung mittels Mäusegift und Schneckenkorn.

Wie bei anderen Anbausystemen auch können Vorteile des Direktsaatsystems in bestimmten Situationen zu Nachteilen werden. So sorgt die Reflexion der Sonneneinstrahlung durch die Mulchschicht an der Bodenoberfläche für gemäßigttere Bodentemperaturen, was insbesondere in heißen und trockenen Perioden besonders vorteilhaft ist. Auf der anderen Seite kommt es dadurch jedoch zu einer langsameren Erwärmung des Bodens im Frühjahr, was insbesondere in nassen und kalten Jahren nachteilig sein kann, da die kritische Bodentemperatur für die Aussaat zu spät erreicht wird. Deshalb ist es wichtig bei der Umstellung auf ein Direktsaatsystem zunächst auf nur einem Teil der Betriebsfläche zu beginnen, um zunächst Erfahrungen mit dem Anbausystem zu sammeln und somit kostspielige Fehler zu vermeiden (DERPSCH, 2004). Ein erfolgreiches Direktsaatsystem impliziert also nicht einfach nur den Kauf einer Direktsaatmaschine, sondern eine umfassende ackerbauliche Anpassung des gesamten Anbausystems hinsichtlich Furchtfolgegestaltung, Düngung und Pflanzenschutz.

Neben den zahlreichen Vorteilen, die mit der bestmöglichen Vermeidung von Bodenschadverdichtungen verbunden sind, gibt es auch systembedingte Herausforderungen, die bei der Umstellung auf CTF bedacht werden müssen. Auf Grund der besonderen Bauform des NEXAT Widespan Fahrzeuges und dem besonders geringen Spurfächenanteil können einige Probleme, die in CTF-Systemen mit konventioneller Technik auftreten, gelöst werden. Dazu zählt beispielsweise die notwendige aufwendige Anpassung konventioneller Technik, um die permanenten Fahrgassen nutzen zu können (z.B. Verlängerung Entladerohr Mähdrescher) oder die durch die Anpassung hervorgerufene eingeschränkte Straßenverkehrstauglichkeit, die in einigen Regionen der Welt bedeutsam ist (z.B. Anpassung auf 3 Meter Traktorspur in Europa). Auf Grund der bestmöglichen Integration der verschiedenen Module in das NEXAT Widespan Fahrzeug und dem relativ einfachen Wechsel von Arbeits- in Transportstellung durch das Drehen der Räder um 90°, erhält man ein vollintegriertes System, welches ohne rechtliche Verstöße auf öffentlichen Straßen umgesetzt werden kann.

Eine weitere große Herausforderung von CTF-Systemen, die auf konventioneller Technik basieren, ist die Strohverteilung. Mähdrescher mit Arbeitsbreiten größer 9 m können je nach Bedingungen schnell an die Grenzen einer homogenen Strohverteilung über die gesamte

Breite kommen. Da über Jahre die gleichen Fahrspuren genutzt werden, kann es direkt hinter dem Mährescher zu einer enormen Anhäufung von organischem Material kommen, während in den Randbereichen der Schneidwerksarbeitsbreite wenig Stroh und Spreureste zu finden sind. Diese heterogene Strohverteilung ist insbesondere in Direktsaatsystemen problematisch, da es bei der nachfolgenden Aussaat im Bereich der Fahrspuren des Mähreschers zu Problemen mit der Aussaattechnik sowie zu erheblichen Pflanzenschäden durch Mäuse und Schnecken kommen kann. Dies ist nicht zuletzt der Grund, warum das Stroh in konventionellen CTF-Systemen häufig abgefahren wird. Das NEXAT Widespan-CTF löst dieses Problem durch die Bauweise des NEXCO Mähreschermoduls mit der Aufteilung des Gutstromes und der damit verbundenen Nutzung von zwei Strohhäckslern und Spreuverteilern, die das organische Material über die gesamte Arbeitsbreite des Mähreschers gleichmäßig verteilen. Auf Grund der Tatsache, dass die Ernterückstände im NEXAT WS-CTF ohne Probleme auf dem Feld verbleiben können, trägt das NEXAT WS-CTF System auf diese Weise auch zum Erhalt und Aufbau der C_{org} -Gehalte des Bodens bei.

Eine weitere Herausforderung, die auch im NEXAT WS-CTF bedacht werden muss, ist die reduzierte Effizienz des Feldeinsatzes bei Arbeiten, die eine entsprechende Logistik erfordern. Dazu zählen z.B. das Gülleausbringen oder der Mähdrusch. Die Firma Kalverkamp versucht diesem Aspekt Rechnung zu tragen, indem die Arbeitsbreite des Verteilgestänges im Verhältnis zur Fassgröße von 32 m³ mit 14 m relativ klein gehalten wurde. Dabei wird die Strategie verfolgt möglichst eine Schlaglänge abarbeiten zu können, bevor am Vorgewende wieder organischer Dünger befüllt wird. Trotz der vergleichsweise geringen Arbeitsbreite wird eine hohe Schlagkraft durch eine entsprechende Fahrgeschwindigkeit erreicht.

Zu den Herausforderungen, die sowohl in konventionellen CTF-Systemen als auch WS-CTF-Systemen auftreten, gehören Probleme beim Anbau von Reihenkulturen, wie Mais oder Sojabohnen in Direktsaat. Die Säaggregate laufen bei zwei aufeinander folgenden Kulturen mit gleicher Reihenweite in der Stoppelreihe der Vorfrucht. Hier können entweder unterschiedliche Reihenweiten, ein Verschieberahmen für die Säaggregate oder ein leichter Spurversatz Abhilfe schaffen. Im Falle des Spurversatzes würde jedoch der Anteil der überfahrenen Fläche zunehmen, was im Sinne der Prävention von Verdichtungen vermieden werden sollte.

Darüber hinaus kann Wassererosion über die permanenten Fahrgassen ein Problem in CTF-Systemen sein. Auf Grund ihrer starken Verdichtung können sie insbesondere in kuppertem Gelände als Wasserkanäle für den Bodenabtrag dienen. Hier sollte besonderes Augenmerk auf dem angepassten Anlegen (z.B. quer zum Hang) sowie einem möglichen Bewuchs der Fahrspuren liegen.

Insgesamt muss man beim Vergleich von RTF-Systemen mit CTF-Systemen beachten, dass es in RTF-Systemen je nach Einsatzbedingungen (Witterung, Bodenzustand, Maschinengewicht, Reifendruck etc.) trotz des deutlich höheren Anteils überrollter Fläche nicht immer zu Verdichtungsereignissen kommt, die sich signifikant auf das Pflanzenwachstum auswirken. Auf der anderen Seite kann es auch in CTF-Systemen zu leichten Verdichtungen in der Wachstumszone kommen, wenn Anbaugeräte falsch eingesetzt werden (z.B. Verdichtung durch Tiefenführungsrollen in Folge sehr hohen Schadruckes unter feuchten Bedingungen). Deshalb ist bei der Interpretation von Vergleichsergebnissen immer auch zu berücksichtigen, von welchem Verdichtungsgrad im RTF-System ausgegangen wird. Dennoch bleibt festzuhalten, dass das Verdichtungspotenzial in CTF-Systemen gegenüber RTF-Systemen auf Grund des deutlich geringeren Anteils überfahrener Fläche stark reduziert ist.

9 Fazit

Aus der stetig wachsenden Weltbevölkerung und den sich verändernden gesellschaftlich und politischen Rahmenbedingungen ergibt sich die dringende Notwendigkeit eines Paradigmenwechsels und einer damit verbundenen Anpassung der Landbewirtschaftung. Der alleinige Fokus auf die Ertragsmaximierung, der die Agrarproduktion in den vergangenen Jahren bestimmt hat, wird den vielfältigen und steigenden Ansprüchen unterschiedlicher Stakeholder der Nahrungsmittelerzeugung (z.B. Politiker, Verbraucher, verarbeitenden Unternehmen) nicht mehr gerecht. Um als Produzent von landwirtschaftlichen Rohstoffen auch zukünftig wettbewerbsfähig und erfolgreich zu sein, wird neben der notwendigen Steigerung der Nahrungsmittelproduktion eine möglichst ressourcenschonende Bewirtschaftungsweise immer wichtiger.

Die vorliegende Arbeit gibt eine Übersicht über vielversprechende agronomische Ansätze, die zum einen den global ablaufenden Prozess der Bodendegradation stark vermindern und zugleich die Bodengesundheit, die als zentrales Konzept zur Umsetzung der nachhaltigen Intensivierung angesehen werden kann, signifikant fördern. So können wichtige Komponenten eines gesunden Bodens, wie z.B. die Abundanz von Bodenlebewesen und C_{org} -Gehalte, durch ackerbauliche Maßnahmen, wie einer ganzjährigen Bodenbedeckung mittels diversen ZF-Mischungen in Verbindung mit ausbleibender Bodenbearbeitung, maßgeblich verbessert werden. Das Ziel muss letztlich die Nachahmung natürlicher Ökosysteme sein, wodurch offene Stoffkreisläufe geschlossen werden und der Einsatz sowie die mit der Produktion und Ausbringung verbundenen Umweltauswirkungen von externen Betriebsmitteln reduziert werden können.

Das NEXAT WS-CTF bietet durch den äußerst geringen Spurflächenanteil und der damit verbundenen ausbleibenden Verdichtung des Bodens die optimale Technologie für eine erfolgreiche Umsetzung der empfohlenen agronomischen Maßnahmen (z.B. Direktsaat) und damit auch für den Aufbau gesunder Böden wodurch mittel- und langfristig höhere Erträge erzielt und die Umweltauswirkungen der Lebensmittelerzeugung erheblich reduziert werden können. Dies spiegelt sich letztlich auch in deutlich geringeren Produktionskosten wider (z.B. reduzierte Düngerkosten durch erhöhte Nutzungseffizienz).

Insgesamt ist also die Kombination ressourcenschonender pflanzenbaulicher Maßnahmen wie ZF-Anbau und Direktsaat ein äußerst erfolgsversprechender Ansatz für eine nachhaltige

Steigerung der Lebensmittelproduktion, wobei das WS-CTF-System die optimale Technologie zur Anpassung der Landwirtschaft bietet. Es kann somit als wichtige Voraussetzung für eine langfristig erfolgreiche Umstellung angesehen werden.

Aufbauend auf dieser Arbeit wären Langzeitfeldversuche interessant, um die kombinierten Effekte von ZF-Anbau, Direktsaat und WS-CTF unter Praxisbedingungen quantifizieren zu können und somit belastbare Ergebnisse zu erhalten. In der wissenschaftlichen Literatur wurde bisher hauptsächlich der Effekt einzelner Maßnahmen untersucht.

Bei der Bearbeitung dieser Studie haben sich weitere Forschungsfragen ergeben:

- Welche Substanz in der komplexen Mischung von Wurzelexsudaten zieht welche Mikroorganismen an? Ist eine künstliche Synthese möglich, um diese Substanzen zur Förderung des Bodenlebens auszubringen?
- Wie hoch sind die Ertragsunterschiede beim Vergleich eines RTF-Systems mit einem CTF-System, wenn anstelle von einfachen Side-by-Side-Versuchen die Systemeffekte berücksichtigt werden (z.B. frühere Befahrbarkeit nach Niederschlägen)?
- Welche Pflanzenarten eignen sich, um die langfristige Befahrbarkeit von CTF-Spuren sicherzustellen?

Insbesondere im Bereich des mikrobiellen Bodenlebens und den Mikroorganismen-Pflanzen-Interaktionen, die von zentraler Bedeutung für einen gesunden Boden sind, konnte ein umfassender Forschungsbedarf offengelegt werden.

10 Literaturverzeichnis

- ALVAREZ, R. (2005): A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. In: *Soil Use and Management* 21 (1): 38-52.
- ARVIDSSON, J. and I. HAKANSSON (2014): Response of different crops to soil compaction - Short-term effects in Swedish field experiments. In: *Soil & Tillage Research* 138: 56-63.
- BAKER, J.M., T.E. OCHSNER, R.T. VENTEREA and T.J. GRIFFIS (2007): Tillage and soil carbon sequestration - What do we really know? In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118: 1-5.
- BALOTA, E.L., A. CALEGARI, A.S. NAKATANI and M.S. COYNE (2014): Benefits of winter cover crops and no-tillage for microbial parameters in a Brazilian Oxisol: A long-term study. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 197: 31-40.
- BANO, S., X. WU and X. ZHANG (2021): Towards sustainable agriculture: rhizosphere microbiome engineering. In: *Applied Microbiology and Biotechnology* 105: 7141-7160
- BAYHAN, Y., B. KAYISOGLU and E. GONULOL (2002): Effect of soil compaction on sunflower growth. In: *Soil & Tillage Research* 68: 31-38.
- BELL, M. and D. LAWRENCE (2009): Soil carbon sequestration – myths and mysteries. In: *Tropical Grasslands* 43: 227-231.
- BERTRAND, M., S. BAROT, M. BLOUIN, J. WHALEN, T. DE OLIVEIRA and J. ROGER-ESTRADE (2015): Earthworm services for cropping systems. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 35: 553-567.
- BEYLICH, A., H.-R. OBERHOLZER, S. SCHRADER, H. HÖPER and B.-M. WILKE (2010): Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils. In: *Soil and Tillage Research* 109 (2): 133-143.
- BHATTACHARYYA, S.S., G.H. ROS, K. FURTAK, H.M.N. IQBAL and R. PARRA-SALDÍVAR (2022): Soil carbon sequestration – An interplay between soil microbial community and soil organic matter dynamics. In: *Science of the Total Environment* 815: 1-13.

BMEL (2023): Eiweißpflanzenstrategie des BMEL. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/ackerbau/eiweisspflanzenstrategie.html>

BRANDHUBER, R. (2006): Bodenbelastung durch Landmaschinen - Wirkungsmechanismen und Risikobeurteilung. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.): Ackerbau vor neuen Herausforderungen. 1. Auflage, Freising-Weihenstephan.

BUIS, A. (2022): Steamy Relationships: How Atmospheric Water Vapor Amplifies Earth's Greenhouse Effect. Zuletzt abgerufen am 26.06.2023, von <https://climate.nasa.gov/explore/ask-nasa-climate/3143/steamy-relationships-how-atmospheric-water-vapor-amplifies-earths-greenhouse-effect/>

CASTLE, S.C., D.A. SAMAC, J.L. GUTKNECHT, M.J. SADOWSKY, C.J. ROSEN, D. SCHLATTER and L.L. KINKEL (2021): Impacts of cover crops and nitrogen fertilization on agricultural soil fungal and bacterial communities. In: *Plant and Soil* 466: 139-150.

CHAMEN, W.C.T, A.P. MOXEY, W. TOWERS, B. BALANA and P.D. HALLETT (2015): Mitigating arable soil compaction: A review and analysis of available cost and benefit data. In: *Soil & Tillage Research* 146: 10-25.

CHAPARRO, J.M., A.M., SHEFLIN, D.K. MANTER and J.M. VIVANCO (2012): Manipulating the soil microbiome to increase soil health and plant fertility. In: *Biology and Fertility of Soils* 48: 489-499.

COLOMBI, T. and T. KELLER (2019): Developing strategies to recover crop productivity after soil compaction—A plant eco-physiological perspective. In: *Soil & Tillage Research* 191: 156-161.

CRAMER, B. (2006): Überprüfung von Bewertungsmodellen zur Identifikation und Prognose von Schadverdichtungen auf Ackerböden in Nordrhein-Westfalen. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn.

CUARTERO, J., J.A. PASCUAL, J.-M. VIVO, O. OZBOLAT, V. SÁNCHEZ-NAVARRO, M. EGEA-CORTINES, R. ZORNOZA, M.M. MENA, E. GARCIA and M. ROS (2022): A first-year melon/cowpea intercropping system improves soil nutrients and changes the soil microbial community. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 328: 1-8.

DACEY, J. (2009): Der US-Dürre von 1930 auf der Spur. Zuletzt abgerufen am 26.06.2023, von <https://www.swissinfo.ch/ger/der-us-duerre-von-1930-auf-der-spur/7428216>

DE HAEN, H. and V. RÉQUILLART (2014): Linkages between sustainable consumption and sustainable production: some suggestions for foresight work. In: *Food Security* 6: 87-100.

DERPSCH, R. (2004): Schritte für die erfolgreiche Umsetzung von Direktsaat. Zuletzt abgerufen am 29.06.2023, von <http://www.rolf-derpsch.com/direktsaat/schritte-zur-erfolgreichen-umsetzung/>

DEThERIDGE, A.P., G. BRAND, R. Fychan, F.V. CROTTY, R. SANDERSON, G.W. GRIFFITH and C.L. MARLEY (2016): The legacy effect of cover crops on soil fungal populations in a cereal rotation. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 228: 49-61.

DEUTSCHER WETTERDIENST (2023): Klima-arides. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://www.dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv3=101416&lv2=101334>

DRIVER, J.D., W.E. HOLBEN and M.C. RILLIG (2005): Characterization of glomalin as a hyphal wall component of arbuscular mycorrhizal fungi. In: *Soil Biology & Biochemistry* 37: 101-106.

DUBEY, A., M.A. MALLA, F. KHAN, K. CHOWDHARY, S. YADAV, A. KUMAR, S. SHARMA, P.K. KHARE and M.L. KHAN (2019): Soil microbiome: a key player for conservation of soil health under changing climate. In: *Biodiversity and Conservation* 28: 2405-2429.

DUCHENE, O., J.-F. VIAN and F. CELETTE (2017): Intercropping with legume for agroecological cropping systems: Complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 240:148-161.

DUTTMANN, R. und M. KUHWALD (2018): Wirkungen der Bodenerosion auf Bodeneigenschaften und Ertrag. In: Blume H.P., P. Felix-Henningsen, H.-G. Frede, G. Guggenberger, R. Horn und K. Stahr (Hrsg.): *Handbuch der Bodenkunde*, 42. Ergänzungslieferung. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim.

EUROPEAN COMMISSION (2020): Farm to Fork Strategy:

https://food.ec.europa.eu/system/files/2020-05/f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf

FINNEY, D.M., J.S. BUYER and J.P. KAYE (2017): Living cover crops have immediate impacts on soil microbial community structure and function. In: *Journal of Soil and Water Conservation* 72 (4): 361-373.

FRAC, M., S.E. HANNULA, M. BELKA and M. JEDRYCZKA (2018): Fungal Biodiversity and Their Role in Soil Health. In: *Frontiers in Microbiology* 9: 1-9.

GAUTAM, A., U. SEKARAN, J. GUZMAN, P. KOVÁCS, J.L.G. HERNANDEZ and S. KUMAR (2020): Responses of soil microbial community structure and enzymatic activities to long-term application of mineral fertilizer and beef manure. In: *Environmental and Sustainability Indicators* 8: 1-12.

GEISCHER, R. und M. DEMMEL (2006): Landtechnische Möglichkeiten zur Vermeidung von schädigenden Bodenbelastungen im Ackerbau. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.): *Ackerbau vor neuen Herausforderungen*. 1. Auflage, Freising-Weihenstephan.

GEISSELER, D. and K.M. SCOW (2014): Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms - A review. In: *Soil Biology & Biochemistry* 75: 54-63.

GUENET, B., B. GABRIELLE, C. CHENU, D. ARROUAYS, J. BALESSENT, M. BERNOUX, E. BRUNI, J.-P. CALIMAN, R. CARDINAEL, S. CHEN, P. CIAIS, D. DESBOIS, J. FOUCHE, S. FRANK, C. HENAULT, E. LUGATO, V. NAIPAL, T. NESME, M. OBERSTEINER, S. PELLERIN, D.S. POWLSON, D.P. RASSE, F. REES, J.-F. SOUSSANA, Y. SU, H. TIAN, H. VALIN and F. ZHOU (2020): Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? In: *Global Change Biology* 27 (2): 237-256.

HADDAWAY, N.R., K. HEDLUND, L.E. JACKSON, T. KÄTTERER, E. LUGATO, I.K. THOMSEN, H.B. JØRGENSEN and P.-E. ISBERG (2017): How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. In: *Environmental Evidence* 6: 1-48.

HALLAMA, M., C. PEKRUN, H. LAMBERS and E. KANDELER (2019): Hidden miners – the roles of cover crops and soil microorganisms in phosphorus cycling through agroecosystems. In: *Plant and Soil* 434: 7-45.

- HALLER, L., S. MOAKES, U. NIGGLI, J. RIEDEL, M. STOLZE und M. THOMPSON (2020): Entwicklungsperspektiven der ökologischen Landwirtschaft in Deutschland. In: Umweltbundesamt (Hrsg.). Verlag Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- HAMZA, M.A. and W.K. ANDERSON (2005): Soil compaction in cropping systems - A review of the nature, causes and possible solutions. In: Soil & Tillage Research 82:121-145.
- HARTMANN, K., H. LILIENTHAL, M. ABU-HASHIM, R. AL-HASSOUN, Y. EIS, K. STÖVEN und E. SCHNUG (2009): Vergleichende Untersuchungen der Infiltrationseigenschaften von konventionell und ökologisch bewirtschafteten Böden. In: Julius-Kühn-Institut (Hrsg.). Verlag Julius-Kühn-Institut, Braunschweig.
- HAYAT, R., S. ALI, U. AMARA, R. KHALID and I. AHMED (2010): Soil beneficial bacteria and their role in plant growth promotion: a review. In: Annals of Microbiology 60 (4): 579-598.
- IMFELD, G. and S. VUILLEUMIER (2012): Measuring the effects of pesticides on bacterial communities in soil: A critical review. In: European Journal of Soil Biology 49: 22-30.
- IPBES (2018): The IPBES assessment report on land degradation and restoration. Montanarella, L., Scholes, R., and Brainich, A. (eds.). In: Secretariat of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, Bonn.
- ISLAM, W., A. NOMAN, H. NAVEED, Z. HUANG and H.Y.H. CHEN (2020): Role of environmental factors in shaping the soil microbiome. In: Environmental Science and Pollution Research 27: 41225–41247.
- JOHN, D.A. and G.R. BABU (2021): Lessons From the Aftermaths of Green Revolution on Food System and Health. In: Frontiers in Sustainable Food Systems 5: 1-6.
- JOHNSON, D., J. ELLINGTON and W. EATON (2015): Development of soil microbial communities for promoting sustainability in agriculture and a global carbon fix. In: PeerJ PrePrint: 1-58.
- JONES, C. (2019): Building New Topsoil Through The Liquid Carbon Pathway. Zuletzt abgerufen am 26.06.2023, von https://www.youtube.com/watch?v=C3_w_Gp1mLM

- KALIA, A. and S.K. GOSAL (2011): Effect of pesticide application on soil microorganisms. In: Archives of Agronomy and Soil Science 57 (6): 569-596.
- KALVERKAMP MASCHINENBAU (2023a): NEXAT revolution – Das System. Zuletzt abgerufen am 26.06.2023, von <https://www.nexat.de/das-system/>
- KALVERKAMP MASCHINENBAU (2023b): Modell 2023. Interner Ordner, zuletzt abgerufen am 26.06.2023, von <https://teamkalverkamp.sharepoint.com/sites/Marketing/Freigegebene%20Dokumente/Forms/AllItems.aspx?id=%2Fsites%2FMarketing%2FFreigegebene%20Dokumente%2FPictures%20and%20videos%2FModell%202023&p=true&ga=1>
- KHAN, M.S., A. ZAIDI, M. AHMED, M. OVES and P.A. WANI (2010): Plant growth promotion by phosphate solubilizing fungi – current perspective. In: Archives of Agronomy and Soil Science 56 (1): 73-98.
- KIM, N., M.C. ZABALAY, K. GUAN and M.B. VILLAMIL (2020): Do cover crops benefit soil microbiome? A meta-analysis of current research. In: Soil Biology and Biochemistry 142: 1-14.
- KOLBE, H. (2008): Fruchtfolgegrundsätze im Ökologischen Landbau. In: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.): Arbeitspapier, Dresden.
- KOLBE, H., J. ZIMMER, R. BECK, J. BREUER, J. REINHOLD, G. BARTHELMES, A. BAURIEGEL, C. WEISER, I. BULL, G. EBEL und H. HANFF (2015): Leitfaden zur Humusversorgung: Informationen für Praxis, Beratung und Schulung. In: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (Hrsg.). Verlag Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Dresden.
- KUZYAKOV, Y. and G. DOMANSKI (2000): Carbon input by plants into the soil. Review. In: Journal of Plant Nutrition and Soil Science 163: 421-431.
- LAL, R. (2016): Soil health and carbon management. In: Food and Energy Security 5 (4): 212-222.
- LAL, R., W. NEGASSA, K. LORENZ (2015): Carbon sequestration in soil. In: Current Opinion in Environmental Sustainability 15: 79-86.
- LARINK, O., S. SCHRADER und M. LANGMAACK (1997): Bodenverdichtung – eine Gefahr für den Ackerboden und seine Tierwelt. In Mitteilungen aus der NNA 3/97: 1-7.

- LEE, J.A. and T.E. GILL (2015): Multiple causes of wind erosion in the Dust Bowl. In: *Aeolian Research* 19: 15-36.
- LEINWEBER, P., U. BATHMANN, U. BUCZKO, C. DOUHAIRE, B. EICHLER-LÖBERMANN, E. FROSSARD, F. EKARDT, H. JARVIE, I. KRÄMER, C. KABBE, B. LENNARTZ, P.-E. MELLANDER, G. NAUSCH, H. OHTAKE and J. TRÄNCKNER (2018): Handling the phosphorus paradox in agriculture and natural ecosystems: Scarcity, necessity, and burden of P. In: *Ambio* 47: 3-19.
- LI, Z. and H. FANG (2016): Impacts of climate change on water erosion: A review. In: *Earth-Science Reviews* 163: 94-117.
- LONGEPIERRE, M., F. WIDMER, T. KELLER, P. WEISSKOPF, T. COLOMBI, J. SIX and M. HARTMANN (2021): Limited resilience of the soil microbiome to mechanical compaction within four growing seasons of agricultural management. In: *ISME Communications* 1: 1-13.
- MARQUARD, R. (2000): Stickstoffassimilation und die Symbiose mit Knöllchenbakterien. Zuletzt abgerufen am 26.06.2023, von <http://geb.uni-giessen.de/geb/volltexte/2000/320/original/sticksto.htm>
- MARTÍNEZ, I., A. CHERVET, P. WEISSKOPF, W.G. STURNY, A. ETANA, M. STETTLER, J. FORKMAN, T. KELLER (2016): Two decades of no-till in the Oberacker long-term field experiment: Part I. Crop yield, soil organic carbon and nutrient distribution in the soil profile. In: *Soil & Tillage Research* 163: 141-151.
- MATHEW, R.P., Y. FENG, L. GITHINJI, R. ANKUMAH, K.S. BALKCOM (2012): Impact of No-Tillage and Conventional Tillage Systems on Soil Microbial Communities. In: *Applied and Environmental Soil Science*: 1-11.
- MBUTHIA, L.W., V. ACOSTA-MARTÍNEZ, J. DEBRUYN, S. SCHAEFFER, D. TYLER, E. ODOI, M. MPHESHEA, F. WALKER and N. EASH (2015): Long term tillage, cover crop, and fertilization effects on microbial community structure, activity: Implications for soil quality. In: *Soil Biology & Biochemistry* 89: 24-34.

MINASNY, B., B.P. MALONE, A.B. MCBRATNEY, D.A. ANGERS, D. ARROUAYS, A. CHAMBERS, V. CHAPLOT, Z.-S. CHEN, K. CHENG, B.S. DAS, D.J. FIELD, A. GIMONA, C.B. HEDLEY, S.Y. HONG, B. MANDAL, B.P. MARCHANT, M. MARTIN, B.G. MCCONKEY, V.L. MULDER, S. O'ROURKE, A.C. RICHER-DE-FORGES, I. ODEH, J. PADARIAN, K. PAUSTIAN, G. PAN, L. POGGIO, I. SAVIN, V. STOLBOVOY, U. STOCKMANN, Y. SULAEMAN, C.-C. TSUI, T.-G. VÅGEN, B. VAN WESEMAEL and L. WINOWIECKI (2017): Soil carbon 4 per mille. In: *Geoderma* 292: 59-86.

MINASNY, B. and A.B. MCBRATNEY (2018): Limited effect of organic matter on soil available water capacity. In: *European Journal of Soil Science* 69 (1): 39-47.

MÖLLER, K., G.J. SAUTER, T. MANN, H. FLAIG and J. BREUER (2022): Wissenschaftliche Bewertung der Methoden der Regenerativen Landwirtschaft. In: 132. VDLUFA-Kongress: Optionen für die zukünftige Landnutzung.

MOORE, J.A.M., P.E. ABRAHAM, J.K. MICHENER, W. MUCHERO and M.A. CREGGER (2022): Ecosystem consequences of introducing plant growth promoting rhizobacteria to managed systems and potential legacy effects. In: *New Phytologist* 234: 1914-1918.

MORGAN, J.A.W., G.D. BENDING and P.J. WHITE (2005): Biological costs and benefits to plant-microbe interactions in the rhizosphere. In: *Journal of Experimental Botany* 56: 1729-1739.

MULVANEY, R.L., S.A. KHAN and T.R. ELLSWORTH (2009): Synthetic Nitrogen Fertilizers Deplete Soil Nitrogen: A Global Dilemma for Sustainable Cereal Production. In: *Journal of Environmental Quality* 38 (6): 2295-2314.

NAWAZ, M.F., G. BOURRIÉ and F. TROLARD (2013): Soil compaction impact and modelling. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 33: 291-309.

NEDELCIU, C.E., K.V. RAGNARSDOTTIR, P. SCHLYTER and I. STJERNQUIST (2020): Global phosphorus supply chain dynamics: Assessing regional impact to 2050. In: *Global Food Security* 26: 1-10.

NIVELLE, E., J. VERZEAUX, H. HABBIB, Y. KUZYAKOV, G. DECOCQ, D. ROGER, J. LACOUX, J. DUCLERCQ, F. SPICHER, J.-E. NAVA-SAUCEDO, M. CATTEROU, F. DUBOIS and T. TETU (2016): Functional response of soil microbial communities to tillage, cover crops and nitrogen fertilization. In: *Applied Soil Ecology* 108: 147-155.

- O'SULLIVANA, M.F. and C. SIMOTA (1995): Modelling the environmental impacts of soil compaction: a review. In: Soil & Tillage Research: 69-84.
- PELOSI, C., S. BAROT, Y. CAPOWIEZ, M. HEDDE and F. VANDENBULCKE (2014): Pesticides and earthworms. A review. In: Agronomy for Sustainable Development 34: 199-228.
- PFLANZENFORSCHUNG (2023a): Saprotroph. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/saprotroph>
- PFLANZENFORSCHUNG (2023b): Phosphatase. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/phosphatase-679>
- PFLANZENFORSCHUNG (2023c): Polysaccharide. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/polysaccharide-985>
- PFLANZENFORSCHUNG (2023d): C3-Pflanzen. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/phosphatase-679>
- PFLANZENFORSCHUNG (2023e): C4-Pflanzen. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/c4-pflanzen-830>
- PFLANZENFORSCHUNG (2023f): Wurzelsysteme. Zuletzt abgerufen am 05.07.2023, von <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/wurzelsysteme-336>
- PFLANZENFORSCHUNG (2023g): Einkeimblättrige. Zuletzt abgerufen am 11.07.2023, von <https://www.pflanzenforschung.de/de/pflanzenwissen/lexikon-a-z/einkeimblaettrige-2179>
- PIMENTEL, D. and M. BURGESS (2013): Soil Erosion Threatens Food Production. In: Agriculture 3: 443-463.
- POEPLAU, C. and A. DON (2015): Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. In: Agriculture, Ecosystems and Environment 200: 33-41.
- POPP, J., K. PETŐ and J. NAGY (2013): Pesticide productivity and food security. A review. In: Agronomy for Sustainable Development 33: 243-255.
- PRASHAR, P and S. SHAH, (2016): Impact of Fertilizers and Pesticides on Soil Microflora in Agriculture. In: Sustainable Agriculture Reviews 19: 1-32.
- RAHMAN, N.S.N.A., N.W.A. HAMID and K. NADARAJAH (2021): Effects of Abiotic Stress on Soil Microbiome. In: International Journal of Molecular Sciences 22: 1-36.

- REN, N., Y. WANG, Y. YE, Y. ZHAO, Y. HUANG, W. FU and X. CHU (2020): Effects of Continuous Nitrogen Fertilizer Application on the Diversity and Composition of Rhizosphere Soil Bacteria. In: *Frontiers in Microbiology* 11: 1-13.
- RILLIG, M.C. (2004): Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. In: *Canadian Journal of Soil Science* 84 (4): 1-10.
- RILLIG, M.C. and D.L. MUMMEY (2006): Mycorrhizas and soil structure. In: *New Phytologist* 171: 41-53.
- RODGERS, H.R., J.B. NORTON and L.T.A. VAN DIEPEN (2021): Effects of Semiarid Wheat Agriculture Management Practices on Soil Microbial Properties: A Review. In: *Agronomy* 11: 1-11.
- RUUSKANEN, S., B. FUCHS, R. NISSINEN, P. PUIGBÒ, M. RAINIO, K. SAIKKONEN and M. HELANDER (2023): Ecosystem consequences of herbicides: the role of microbiome. In: *Trends in Ecology & Evolution* 38 (1): 1-9.
- SCAVO, A., S. FONTANAZZA, A. RESTUCCIA, G. R. PESCE, C. ABBATE and G. MAUROMICALE (2022): The role of cover crops in improving soil fertility and plant nutritional status in temperate climates. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 42: 1-25.
- SCHEFFER, F., P. SCHACHTSCHABEL, W. AMELUNG, H.-P. BLUME, H. FLEIGE, R. HORN, E. KANDELER, I. KÖGEL-KNABNER, R. KRETZSCHMAR, K. STAHR, B.-M. WILKE, T. GAISER, J. GAUER, N. STOPPE, S. THIELE-BRUHN und G. WELP (2018): *Lehrbuch der Bodenkunde*, 17., überarbeitete Auflage. In: Springer Verlag, Berlin.
- SCHJONNING, P., LAMANDÉ and M.H. THORSOE (2019): Soil Compaction – Drivers, Pressures, State, Impacts and Responses. In: *DCA Report No. 155*: 1-38.
- SCHMIDT, R., K. GRAVUER, A.V. BOSSANGE, J. MITCHELL and K. SCOW (2018): Long-term use of cover crops and no-till shift soil microbial community life strategies in agricultural soil. In: *PLOS ONE* 13 (2): 1-19.
- SHAH, K.K., S. TRIPATHI, I. TIWARI, J. SHRESTHA, B. MODI, N. PAUDEL and B.D. DAS (2021): Role of soil microbes in sustainable crop production and soil health: A review. In: *Agricultural Science and Technology* 13 (2): 109-118.

- SHAH, A.N., M. TANVEER, B. SHAHZAD, G. YANG, S. FAHAD, S. ALI, M.A. BUKHARI, S.A. TUNG, A. HAFEEZ, B. SOULIYANONH (2017): Soil compaction effects on soil health and crop productivity: an overview. In: *Environmental Science and Pollution Research* 24: 10056-10067.
- SHEEHY, J., K. REGINA, L. ALAKUKKU and J. SIX (2015): Impact of no-till and reduced tillage on aggregation and aggregate-associated carbon in Northern European agroecosystems. In: *Soil & Tillage Research* 150: 107–113.
- SIBLE, C.N. (2022): Characterizing Plant Biostimulants and their Impact on the Soil Microbiome and Productivity of Maize. Dissertation. University of Illinois, Urbana.
- SILVA MATOS, P., C.F. DA SILVA, J.M. DAMIAN, C.E.P. CERRI, M.G. PEREIRA and E. ZONTA (2021): Beneficial services of Glomalin and Arbuscular Mycorrhizal fungi in degraded soils in Brazil. In: *Scientia Agricola* 79: 1-13.
- SILVIA, F., A. FERRERO and F. VIDOTTO (2020): Current and future scenarios of glyphosate use in Europe: Are there alternatives? In: *Advances in Agronomy*: 1-60.
- SINGH, P.K., M. SINGH and B.N. TRIPATHI (2013): Glomalin: an arbuscular mycorrhizal fungal soil protein. In: *Protoplasma* 250: 663-669.
- SINGH, J.K., V.C. PANDEY and D.P. SINGH (2011): Efficient soil microorganisms: A new dimension for sustainable agriculture and environmental development. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 140: 339-353.
- SITLAULA, B.K., S. HANSEN, J.I.B. SITLAULA and L.R. BAKKEN (2000): Effects of soil compaction on N₂O emission in agricultural soil. In: *Chemosphere - Global Change Science* 2: 367-371.
- STOCKMANN, U., M.A. ADAMS, J.W. CRAWFORD, D.J. FIELD, N. HENAKAARCHCHI, M. JENKINS, B. MINASNY, A.B. MCBRATNEY, V. DE REMY DE COURCELLES, K. SINGH, I. WHEELER, L. ABBOTT, D.A. ANGERS, J. BALDOCK, M. BIRD, P.C. BROOKES, C. CHENU, J.D. JASTROW, R. LAL, J. LEHMANN, A.G. O'DONNELL, W.J. PARTON, D. WHITEHEAD and M. ZIMMERMANN (2013): The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. In: *Agriculture, Ecosystems and Environment* 164: 80-99.

UMWELTBUNDESAMT (2018): Volatile Organic Compounds (VOC). Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://www.umweltbundesamt.de/en/topics/health/environmental-impact-on-people/chemical-substances/volatile-organic-compounds-voc#what-are-volatile-organic-compounds-voc>

VLČEK, V. and M. POHANKA (2020): Glomalin – an interesting protein part of the soil organic matter. In: *Soil and Water Research*, 15 (2): 67-74.

VUKICEVICH, E., T. LOWERY, P. BOWEN, J.R. ÚRBEZ-TORRES and M. HART (2016): Cover crops to increase soil microbial diversity and mitigate decline in perennial agriculture. A review. In: *Agronomy for Sustainable Development* 36: 1-14.

WHALLEY, W.R., E. DUMITRUB and A.R. DEXTER (1995): Biological effects of soil compaction. In: *Soil & Tillage Research* 35: 53-68.

WIKIPEDIA (2023a): Lipide. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Lipide>

WIKIPEDIA (2023b): Enzym. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von <https://de.wikipedia.org/wiki/Enzym>

WIKIPEDIA (2023c): Arylsulfatase A. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von https://de.wikipedia.org/wiki/Arylsulfatase_A

WIKIPEDIA (2023d): Intraspezifische Konkurrenz. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von https://de.wikipedia.org/wiki/Intraspezifische_Konkurrenz

WIKIPEDIA (2023e): Interspezifische Konkurrenz. Zuletzt abgerufen am 28.06.2023, von https://de.wikipedia.org/wiki/Interspezifische_Konkurrenz

WIKIPEDIA (2023f): Ausdauernde Pflanze. Zuletzt abgerufen am 05.07.2023, von https://de.wikipedia.org/wiki/Ausdauernde_Pflanze

WILKE, B.-M., A. BEYLICH und H.-R. OBERHOLZER (2009): Beurteilung von Bodenverdichtungen aus Sicht der Bodenbiologie. In: *Bodenschutz* 2: 1-7.

WILLIAMS, A., M.C. HUNTER, M. KAMMERER, D.A. KANE, N.R. JORDAN, D.A. MORTENSEN, R.G. SMITH, S. SNAPP, A.S. DAVIS (2016): Soil Water Holding Capacity Mitigates Downside Risk and Volatility in US Rainfed Maize: Time to Invest in Soil Organic Matter? In: *PLOS ONE* 11: 1-11.

WORTMANN, C.S., J.A. QUINCKE, R.A. DRIJBER, M. MAMO and T. FRANTI (2008): Soil Microbial Community Change and Recovery after One-Time Tillage of Continuous No-Till. In: *Agronomy Journal* 100 (6): 1-6.

ZHANG, W. (2018): Global pesticide use: Profile, trend, cost / benefit and more. In: *Proceedings of the International Academy of Ecology and Environmental Sciences*: 8 (1): 1-27.

ZOMER, R.J., D.A. BOSSIO, R. SOMMER and L.V. VERCHOT (2017): Global Sequestration Potential of Increased Organic Carbon in Cropland Soils. In: *Scientific Reports* 7: 1-8.

11 Glossar

| | |
|--------------------------------------|---|
| Allorhiz | Wurzelsystem mit einer Hauptwurzel von denen Nebenwurzeln abgehen, z.B. Pfahlwurzler wie Rettich (PFLANZENFORSCHUNG, 2023f) |
| Arides Klima | Im Vieljährigen Mittel ist der Gesamtniederschlag geringer als die Verdunstung (DEUTSCHER WETTERDIENST, 2023) |
| Arylsulfatase | Enzym, welches Sulfat von Sulfatiden abspaltet und dadurch die Schwefelverfügbarkeit erhöht (WIKIPEDIA, 2023c) |
| C3-Pflanzen | Überwiegender Teil der höheren Pflanzen gehört zu C3-Pflanzen. Effektivster Grundtypus der Photosynthese unter gemäßigten Temperatur- und Lichtverhältnissen. Bei heißer und trockener Witterung schließen sich jedoch die Spaltöffnungen. Dann sind C4-Pflanzen im Vorteil. (PFLANZENFORSCHUNG, 2023d) |
| C4-Pflanzen | Besser angepasst an hohe Lichteinstrahlung und hohe Temperaturen und damit einhergehend effizientere CO ₂ -Bindung unter solchen Bedingungen, was sich letztlich in einem höheren Biomasseaufbau in kürzerer Zeit widerspiegelt (PFLANZENFORSCHUNG, 2023e) |
| Effektive Kationenaustauschkapazität | Die gesamte Ladungsmenge der austauschbaren Hauptkationen (Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , Al ³⁺ , H ⁺), die ein Boden bei dem aktuellen pH-Wert adsorbieren kann (SCHEFFER ET AL., 2018: 174) |
| Eiweißpflanzenstrategie des BMEL | Förderung des Leguminosenanbaus in Deutschland zur Verbesserung von Ökosystemleistungen, Stärkung von regionalen Wertschöpfungsketten und dem Ausbau der heimischen Eiweißversorgung (BMEL, 2023) |
| Essenzielle Enzyme | Besonders bedeutsame Proteine, die als Katalysatoren in biochemischen Reaktionen dienen und eine Vielzahl von Stoffwechselprozessen steuern (WIKIPEDIA, 2023b) |
| Essenzielle Lipide | Für verschieden Funktionen besonders bedeutsame ganz oder zumindest größtenteils wasserunlösliche Naturstoffe, wie z.B. Fettsäuren (WIKIPEDIA, 2023a) |
| Gesamten Polysaccharide | Langkettige Kohlenhydrate, die aus einer großen Anzahl von Monosacchariden (Einfachzuckern) bestehen und als Speicherstoff sowie Nahrungsgrundlage dienen, z.B. Zellulose (PFLANZENFORSCHUNG, 2023c) |
| Homorhiz | Wurzelsystem, bei dem alle Wurzeln gleich stark ausgeprägt sind und direkt aus der Sprossachse kommen, z.B. Weizen (PFLANZENFORSCHUNG, 2023f) |
| Interspezifische Konkurrenz | Konkurrenz um Lebensraum und Ressourcen zwischen Populationen verschiedener Arten (WIKIPEDIA, 2023e) |
| Intraspezifische Konkurrenz | Konkurrenz um Lebensraum und Ressourcen innerhalb von Populationen, also zwischen mehreren Individuen einer Art (WIKIPEDIA, 2023d) |

| | |
|--------------------------------|--|
| Monokotyle Pflanzen | Pflanzen mit nur einem Keimblatt, z.B. Gräser wie Weizen oder Gerste (PFLANZENFORSCHUNG, 2023g) |
| Perennierend | Mehrjährige Pflanzen, die in der Regel jährlich blühen und aussamen (WIKIPEDIA, 2023f) |
| Phosphatase | Enzyme, die durch Wassereinlagerung (Hydrolyse) aus Phosphorsäureestern oder Polyphosphaten Phosphorsäure abspalten und dadurch die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors erhöhen (PFLANZENFORSCHUNG, 2023b) |
| Saprophytischen Bodenlebewesen | Organismen, die abgestorbenes organisches Material als Hauptnahrungsquelle nutzen (PFLANZENFORSCHUNG, 2023a) |
| Volatile Organic Compunds | Organische kohlenstoffhaltige Verbindungen, die bei Raumtemperatur verdampfen und in die Atmosphäre abgegeben werden (UMWELTBUNDESAMT, 2018) |

Erklärung

Hiermit erkläre ich,

Arnold, Christian

Matrikelnummer 864462

dass ich bei der vorliegenden Master-Thesis/Master-Arbeit die Regeln guter wissenschaftlicher Praxis eingehalten habe. Ich habe diese Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt und die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht.

Betreuender Dozent Herr Prof. Dr. Dr. h.c. mult. Karlheinz Köller

Klemens Kalverkamp

Thema der Arbeit

Potentialanalyse des Pflanzenproduktionssystems NEXAT unter besonderer Berücksichtigung aktueller pflanzenbaulicher Herausforderungen und möglicher Anpassungsstrategien

Semester Sommersemester 2023, 6. Fachsemester

Ich erkläre weiterhin, dass das unverschlüsselte digitale Textdokument der Arbeit übermittelt wurde, das in Inhalt und Wortlaut ausnahmslos der gedruckten Ausfertigung entspricht. Ich bin damit einverstanden, dass diese elektronische Form anhand einer Analyse-Software auf Plagiate überprüft wird.

Osnabrück, 14.07.2023



Ort, Datum, Unterschrift