

Zusammenfassung Masterarbeit Christian Arnold

Hintergrund der Arbeit

Der Agrarsektor steht vor einer zentralen Herausforderung: 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. 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. 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.

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, was in der wissenschaftlichen Literatur als „Sustainable Intensification“ (nachhaltige Intensivierung) bezeichnet wird.

Aktuelle Herausforderungen im konventionellen Pflanzenbau

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.

Je nach Standort und Witterung tragen Wasser- und Winderosion in unterschiedlichem Ausmaß zur Gesamterosion bei. Weltweit betrachtet ist allerdings Wassererosion die Hauptursache für erodierte Flächen.

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, wobei die Bodenabtragsrate von Jahr zu Jahr erheblich variieren kann auf Grund von sich ändernden Witterungsbedingungen und Zeitpunkten von Extremwetterereignissen. 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.

In einer Tonne fruchtbarem Oberboden befinden sich zwischen 1-6 Kilogramm Stickstoff, 1-3 Kilogramm Phosphor und 2-30 Kilogramm Kalium. Bei einem Bodenerosionsereignis können erhebliche Mengen dieser Nährstoffe durch Bodenabfluss in andere Ökosysteme gelangen. 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.

Klimaeffekt

Durch unbewachsene Böden wird insbesondere in den Sommermonaten nach der Ernte das lokale, regionale und sogar globale Klima erheblich beeinflusst. Messungen im Jahr 2020 in Texas haben gezeigt, dass sich die Bodenoberfläche von unbewachsenem Boden bei einer Umgebungstemperatur von 105° Fahrenheit (~ 41° Celsius) auf 155° Fahrenheit (~ 68° Celsius) aufheizt, während auf der Bodenoberfläche einer benachbarten Fläche, auf der eine Sommerzwischenfrucht angebaut wurde, nur eine Temperatur von 77° Fahrenheit (~ 25° Celsius) gemessen wurde.

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 was sich letztlich signifikant auf den Wasserhaushalt als auch auf die Lufttemperaturen auswirkt.

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. 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.

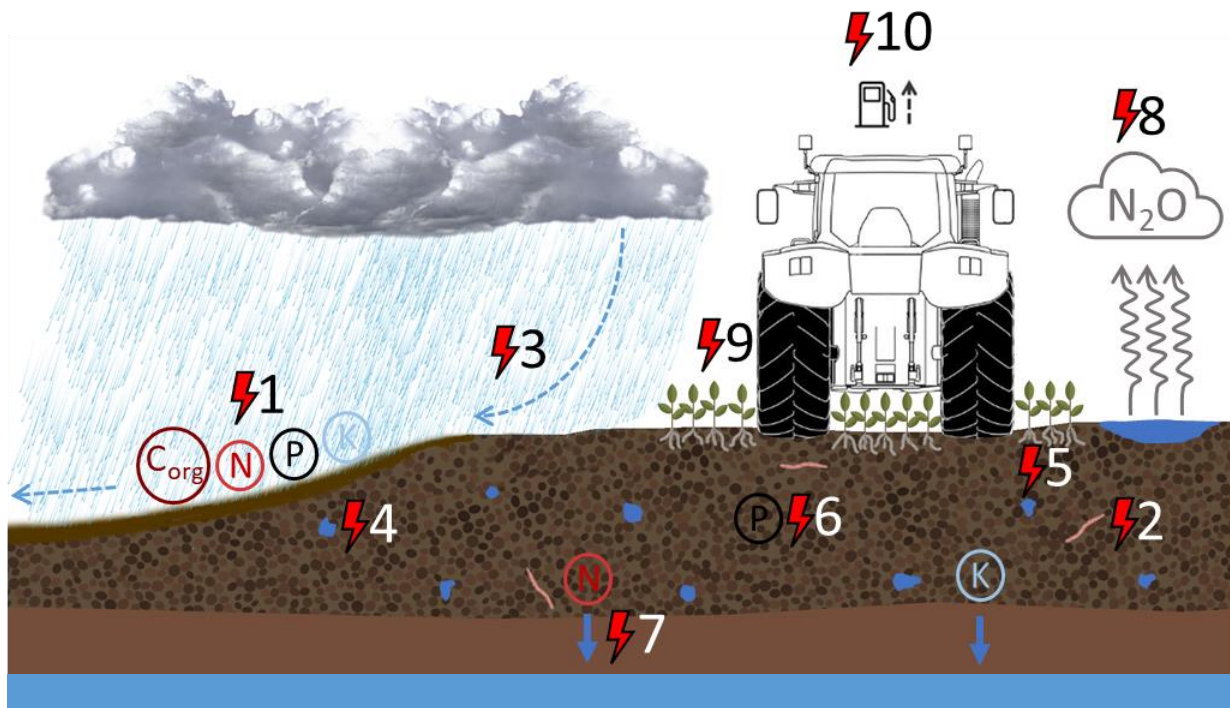
Bodenverdichtung kann als Prozess verstanden werden, bei dem der Porenraum zwischen den Bodenpartikeln reduziert wird, und somit zu einer Zunahme der Lagerungsdichte des Bodens führt. Das Ausmaß einer Bodenschadverdichtung wird einerseits durch die technischen Parameter des Fahrzeuges, wie der Radlast, 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.

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.

Die Bodenstruktur als weiterer 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. Das Ziel dabei ist der Aufbau und Erhalt einer natürlichen Gefügebildung mit einem durchgehenden Porensystem und vergleichsweise kompakter Lagerung der Bodenpartikel.

Auswirkungen von Bodenschadverdichtungen

Abbildung 1: 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 |

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.

Beeinträchtigt Bodenleben (insbesondere Regenwürmer)

Auch das Bodenleben kann durch Verdichtungszoneen 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 Regenwurmorkommens 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 CO_2 -Emissionen, die von dem Anbausystem verursacht werden.

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

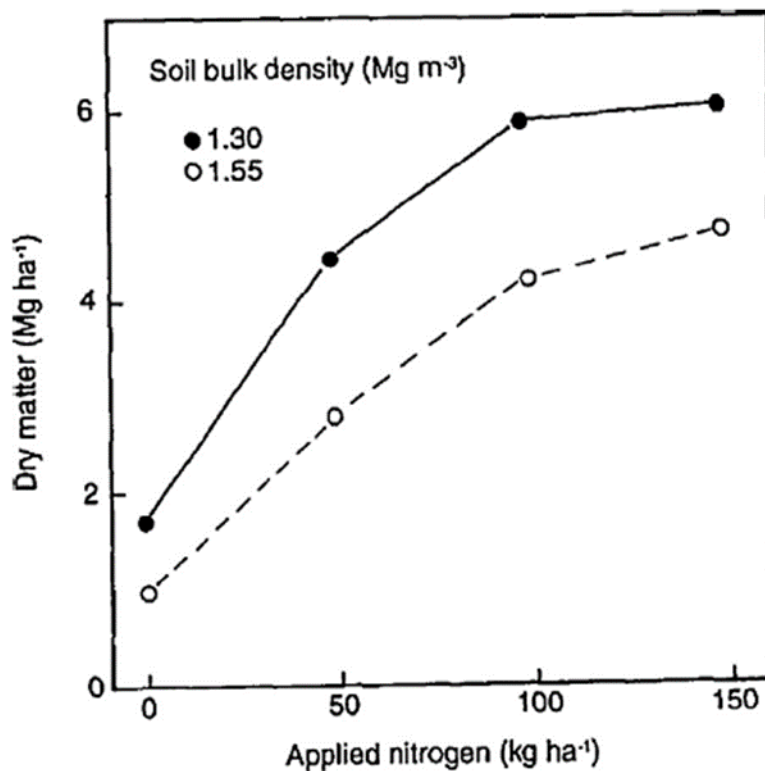


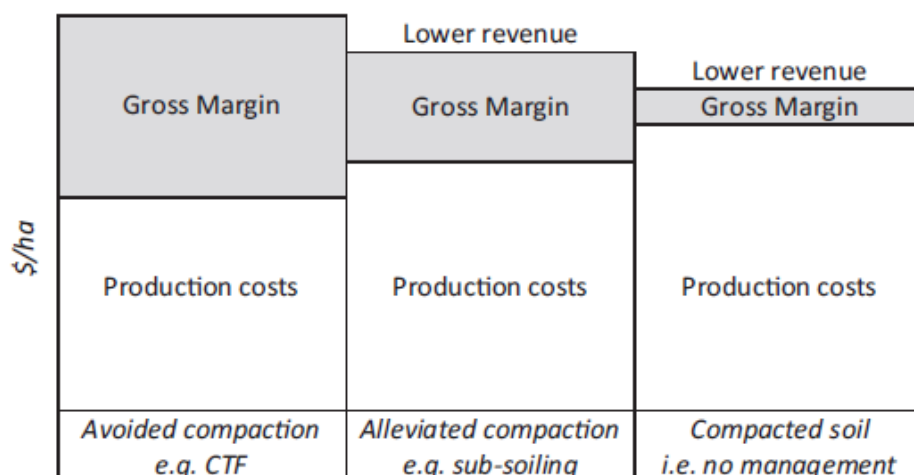
Abbildung 2 zeigt anschaulich den bereits dargestellten Zusammenhang der reduzierten Nährstoffnutzungseffizienz. Gezeigt wird die Beziehung zwischen der applizierten N-Menge und dem Ertrag auf einem verdichteten Boden mit einer Lagerungsdichte von 1,55 Tonnen/m³ und einem unverdichteten Boden mit einer Lagerungsdichte von 1,30 Tonnen/m³. 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.

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. 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.

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



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.

Bezogen auf die Auswirkungen auf Bodenlebewesen kann zunächst zwischen direkten und indirekten Effekten von Mineraldüngerapplikation auf Bodenmikroorganismen unterschieden werden. 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. 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. In verschiedenen Studien konnte festgestellt werden, dass der pH-Wert des Bodens maßgeblich die Zusammensetzung der Bodenmikroorganismen beeinflusst. 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.

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.

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.

Ebenso wie bei den Mineraldüngerwirkungen, 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.

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.

Indirekte Effekte von Pestiziden entstehen hauptsächlich durch eine Veränderung der Pflanzengesellschaft oder Pflanzeigenschaften, da sich pflanzenspezifische Mikroorganismen im Wurzelraum ansiedeln.

Eine der wenigen eindeutigen Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln auf die Mikrobiologie des Bodens ist der Effekt von Fungiziden auf Mykorrhiza-Pilze. So wurde festgestellt, 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.

Abbildung 4: Der Effekt von unterschiedlichen Konzentrationen des Insektizids Imidacloprid auf das Grabeverhalten von zwei Regenwurmartent

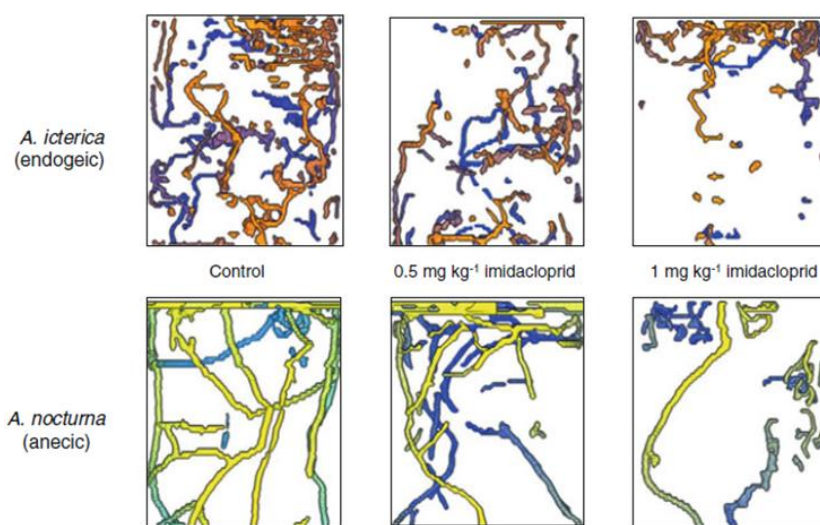


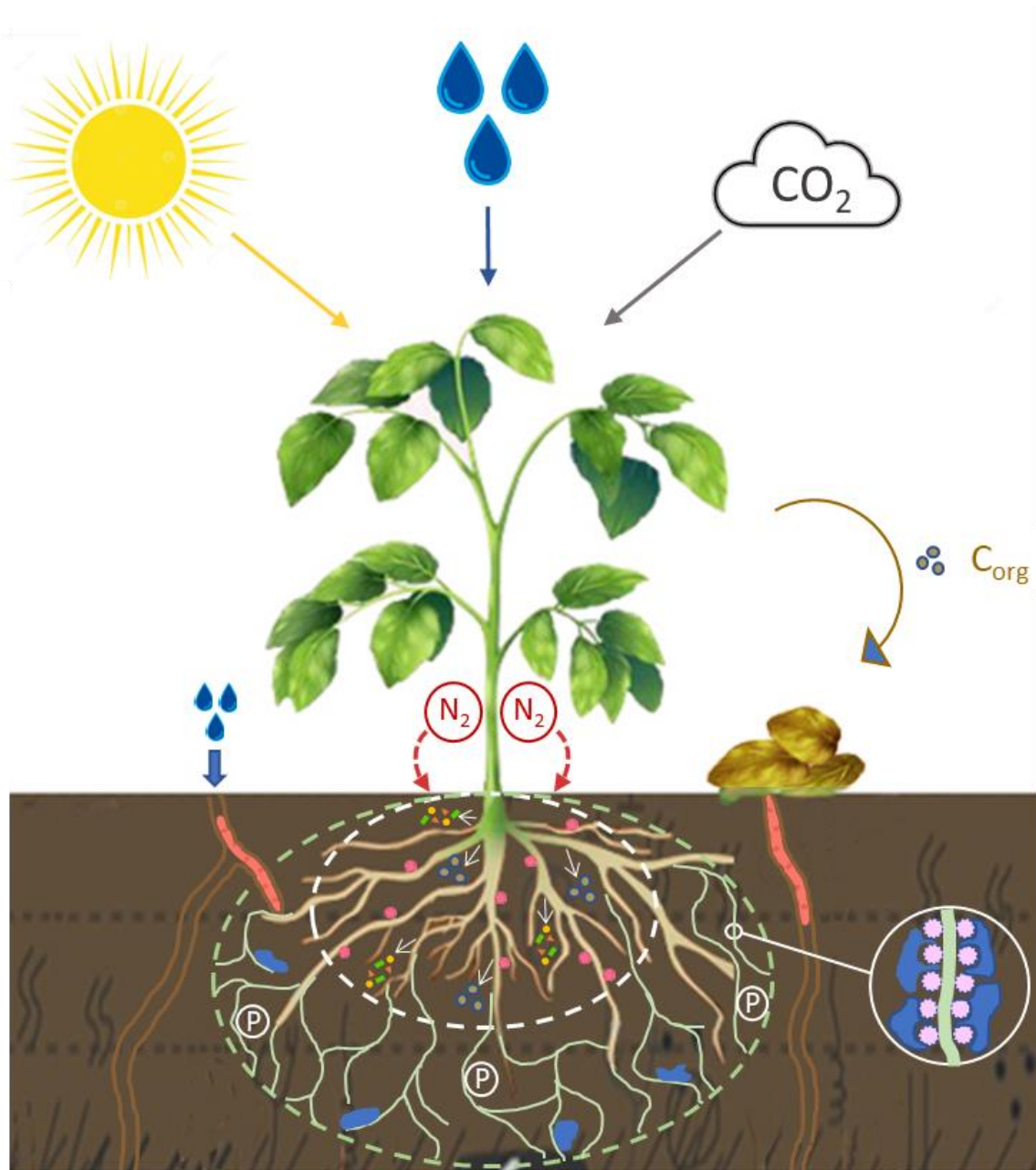
Abbildung 4 zeigt, dass es durch eine Insektizidapplikation zu erheblichen Auswirkungen auf das komplette Tunnelsystem von Regenwürmern kommen kann. Dabei werden die Länge, Tiefe und Verzweigungsrate der Tunnel negativ beeinflusst. Diese Effekte nehmen mit einer ansteigenden Insektizidkonzentration im Boden zu und gehen wahrscheinlich mit einer Abnahme wichtiger bodenphysikalischer Parameter, wie der Wasserinfiltrationsleistung einher.

Insgesamt sind viele Auswirkungen jedoch nicht eindeutig auf Grund der Komplexität der Zusammenhänge, variierenden Versuchsparametern und zahlreichen wenig erforschten Interaktionen zwischen Mikroorganismen und ihrem Habitat Boden und Pflanze.

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. Zentrale Indikatoren eines gesunden Bodens sind ein ausgeprägtes Bodenleben, hohe C_{org} - und Glomalingehalte sowie eine gute Wasserinfiltrationsleistung.

Abbildung 5: Schematische Darstellung eines gesunden Bodens



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

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.

Eine hohe mikrobielle Diversität in einem Boden ist wünschenswert, da dadurch die gesamte Resilienz des Bodenlebens gesteigert wird und unterschiedliche Mikroorganismen (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 Ethylenlevels 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 Organische Substanz (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 Regenwurmängen 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:

Merkmal	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
Effektive Kationenaustauschkapazität	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)

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 5 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.

Anpassungsstrategien des zukunftsorientierten Pflanzenbaus zur Förderung der Bodengesundheit

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 Landwirtschaft bilden. Dazu zählen ZF-Anbau, Direktsaat und CTF (Abbildung 6).

Abbildung 6: 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 pflanzenartsspezifischen 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 (Buschwurzeln vs. Pfahlwurzel) 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 mehrjährige 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.

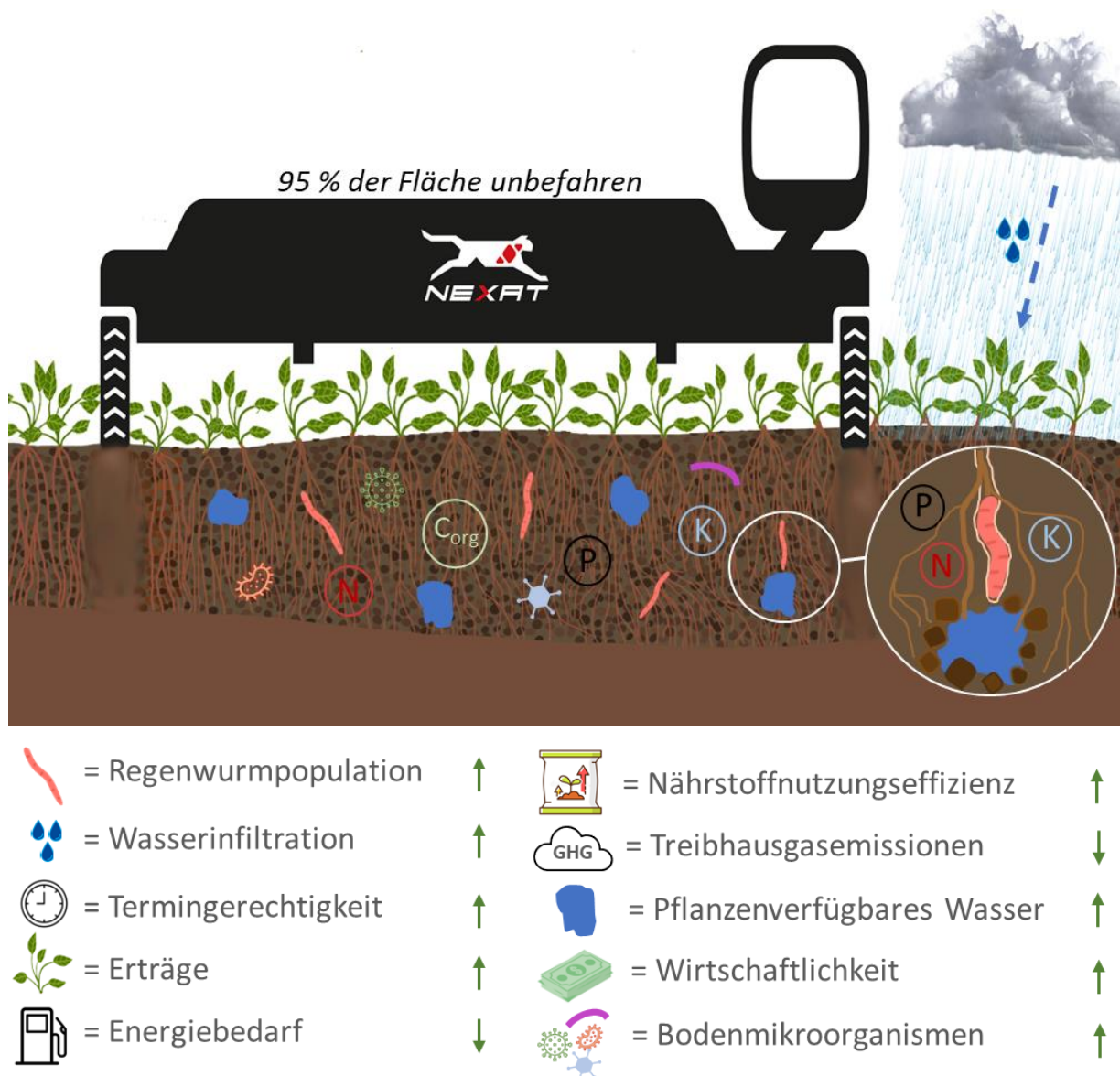
So sorgt die Mulchschicht an der Bodenoberfläche für stark reduzierte Erosionsraten, verringerte Nährstoffeinträge in natürliche Ökosysteme, sowie ein feuchteres und gemäßigeres Mikroklima.

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 7: Vorteile des NEXAT Widespan-CTF-Systems



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 7 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 langfristig 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 Spurfächenanteil 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.

Insgesamt kann der Einsatz des NEXAT WS-CTF-System mit dem äußerst geringen Spurfächenanteil und den damit verbundenen Vorteilen als grundlegende Voraussetzung für eine langfristig erfolgreiche Anpassung der Landwirtschaft (Direktsaat + diverser ZF-Anbau) angesehen werden und ist somit das optimale System, um in Verbindung mit den empfohlenen pflanzenbaulichen Maßnahmen die Erträge zu steigern und gleichzeitig die Umweltauswirkungen der Nahrungsmittelproduktion signifikant zu reduzieren.