

Neuer Wissensstand zum Ökosystem Boden

die große Bedeutung der Mikroorganismen

LANDESAMT FÜR UMWELT,
LANDWIRTSCHAFT
UND GEOLOGIE



Quelle: Burkhard Lehmann, LfULG

neue Humustheorie

- **Alte Humustheorie**

- zwei Humusfraktionen, Entstehung und Stabilität abhängig von Pflanzeninput (Spross, Blätter, Wurzeln, Wurzelexsudate) und dessen Chemischer Zusammensetzung
 - a. Nährhumus [kurzkettige C-Verbindungen, wie Hemicellulose und Cellulose]
 - b. Dauerhumus [langkettige C-Verbindungen, wie Lignin und seine Derivate und langkettige Lipide]

neue Humustheorie

- **Alte Humustheorie**

- zwei Humusfraktionen, Entstehung und Stabilität abhängig von Pflanzeninput (Spross, Blätter, Wurzeln, Wurzelexsudate) und dessen Chemischer Zusammensetzung
 - a. Nährhumus [kurzkettige C-Verbindungen, wie Hemicellulose und Cellulose]
 - b. Dauerhumus [langkettige C-Verbindungen, wie Lignin und seine Derivate und langkettige Lipide]
- neue Ergebnisse widersprechen dieser Annahme:
 - a. Chemisch sehr unterschiedliche Substanzen (Zucker vs. Lignin) verweilen ähnlich lang im Boden (Kallenbach et al. 2016)
 - b. „Huminstoffe“, die angenommenen stabilen Makromoleküle am Ende der Abbaukette von Pflanzenresten haben keine spezielle Molekülstruktur sondern sind Zusammenlagerungen von kleineren Biomolekülen [Pflanzenresten und toten Mikroorganismen] (Baldock et al., 2004; Nelson and Baldock, 2005; Piccolo et al., 2018)

neue Humustheorie

- **Neue Humustheorie**

- Konzept von drei Humusfraktionen, Entstehung und Stabilität abhängig von Zusammenwirken zwischen Pflanzeninputs, **Mikroorganismen** und Eigenschaften des Mineralbodens

neue Humustheorie

Mineral-assoziierte organische Substanz

1. Direkte Sorption von **Pflanzeninput** an Fe- und AL-(Hydr)oxiden und an Schichtsilikate der Ton sowie der Fein- und Mittelschlufffraktion.
2. Der **In vivo mikrobielle Pfad**, d.h. die Verstoffwechselung des **Pflanzeninputs** durch Mikroorganismen (Bakterien und Pilzen) und die Sorption von **mikrobieller Nekromasse und mikrobiellen Exsudaten** an Fe- und AL-(Hydr)oxiden und an Schichtsilikate der Ton sowie der Fein- und Mittelschlufffraktion, ist **mengenmäßig von weit größter Bedeutung** (Kiem and Kögel-Knabner, 2003; Simpson et al., 2007; Liang and Balser, 2008; Liang et al., 2019)

neue Humustheorie

CUE (microbial carbon use efficiency, bzw. **Mikrobielle Kohlenstoffnutzungseffizienz**)

Verhältnis aus

- a) **Baustoffwechsel** (wieviel des Pflanzeninputs die Mikroorganismen in ihr Wachstum investieren)
- b) **Energiestoffwechsel** (wieviel sie veratmen)

Der Baustoffwechsel überwiegt, wenn die Mikroorganismen den Pflanzeninput optimal verstoffwechseln können. Das ist der Fall, wenn das C/N-Verhältnis dem der Mikroorganismen (ca. 7:1) entspricht (Cotrufo et al., 2013).

Von größter Bedeutung für die Ernährung der Mikroorganismen ist hier die Rhizosphäre. Solange Pflanzen Boden bewachsen, erfolgt eine ständige **Ernährung der Mikroorganismen durch Wurzelexsudate** (kurzkettige Zucker, Aminosäuren, org. Säuren, ca. 30 – 40 % der Kohlenhydrate) (Brüggemann et al., 2011).

neue Humustheorie

CUE (microbial carbon use efficiency, bzw. **Mikrobielle Kohlenstoffnutzungseffizienz**)

Verhältnis aus

a) **Baustoffwechsel** (wieviel des Pflanzeninputs die Mikroorganismen in ihr Wachstum investieren)

b) **Energiestoffwechsel** (wieviel sie veratmen)

Der Baustoffwechsel überwiegt, wenn die Mikroorganismen den Pflanzeninput optimal verstoffwechseln können. Das ist der Fall, wenn das C/N-Verhältnis dem der Mikroorganismen (ca. 7:1) entspricht (Cotrufo et al., 2013).

Von größter Bedeutung für die Ernährung der Mikroorganismen ist hier die Rhizosphäre. Solange Pflanzen Boden bewachsen, erfolgt eine ständige **Ernährung der Mikroorganismen durch Wurzelexsudate** (kurzkettige Zucker, Aminosäuren, org. Säuren, ca. 30 – 40 % der Kohlenhydrate) (Brüggemann et al., 2011).

Die besondere Bedeutung der Bodenpilze:

Bodenpilze sind effizienter in ihrer Kohlenstoffnutzung als Bakterien, d.h. **höchste Mikrobielle Kohlenstoffnutzungseffizienz** und höchste Humusanreicherung in Böden mit relativ **hoher Bodenpilzdichte** (Kallenbach et al., 2016).

Die **Mikrobielle Nekromasse** besteht zu einem größerem Anteil (ca. 3:1) aus **Pilz-Nekromasse** (Liang et al., 2019). Aufgrund ihres großen extensiven Myzels haben **Mykorrhizapilze** daran einen besonderen Anteil (Sae-Tun et al., 2022).

neue Humustheorie

Aggregat-assoziierte organische Substanz

oPOM (occluded Particulate Organic Matter bzw. eingeschlossene partikuläre organische Substanz)

3. Physikalische Stabilisierung (Mikroaggregat-in-Makroaggregat Bildung) d.h. Schutz vor Abbau durch Einschluss von organischer Substanz (v.a. Wurzeln) in Bodenaggregaten.

Ein altbekannter Katalysator für die Humusstabilisierung in Bodenaggregaten sind Regenwürmer.

Neu ist die besondere Stellung von **Mikroorganismen (v.a. Mykorrhizapilzen und assoziierten Bakterien)**, da Bildung von **Mikro- und Makroaggregaten** durch:

- a) (biochemisch) die Absonderung von GPRS (Glomalin Related Soil Protein) sowie Schleim, Polysacchariden etc., die als Klebstoff zwischen den Bodenpartikeln wirken und
- b) (physikalisch) extensives Pilzmyzel, das Bodenpartikel umwickelt und an dem Organik und Tonpartikel anhaften (Agnihotri et al., 2021; Bronick and Lal, 2005; Rillig and Mummey, 2006; Six et al., 2004; Yang et al., 2017).

neue Humustheorie

Freiliegende organische Substanz

fPOM (free Particulate Organic Matter, bzw. freiliegende partikuläre organische Substanz)

4. Komplexe Molekülstruktur, d.h. weites C/N - Verhältnis (v.a. Wurzelreste)

Größe dieser Fraktion ist nicht abhängig von Wechselwirkung der Pflanzenreste mit Mineralbodeneigenschaften, sondern hängt mehr vom sonstigen Nährstoffangebot für die Mikroorganismen ab.

Werden die Mikroorganismen mit Wurzelausscheidungen lebender Pflanzen, die dem Wachstums-Bedürfnissen (C/N) angepasst sind, ständig ausreichend ernährt, sind sie nicht auf Energiegewinnung aus schwer umsetzbaren organischen Pflanzenresten angewiesen und diese können sich so im Boden vermehrt als freiliegende partikuläre organische Substanz anreichern.

Bodenpilze als Versorgungs-, Transport- und Nachrichtenwege für Bakterien

- „Pilze wecken Bakterien aus Dornröschenschlaf“
 - Pilze stellen Pumpstationen und Pipelines für Wasser, Substrate und Nährstoffe dar, können unwirtliche Standorte besiedeln und für Bakterien erschließen und so die mikrobielle Aktivität im Boden ankurbeln. (Worrich et al. 2017)
- „Gentransfer auf der Pilzautobahn“
 - Pilze sind mit Bakterien assoziiert, über Pilzhyphen werden genetische Informationen als Antwort auf Umweltveränderungen/ Stress an Bakterien weitergegeben. (Berthold et al. 2016)

Rhizophagenzyklus

Rhizophagenzyklus, pflanzliche Nährstoffaufnahme mittels Bakterien, die zwischen einer intrazellulären endophytischen Phase und einer frei lebenden Bodenphase hin und her wechseln.

In der freilebenden Bodenphase nehmen die Bakterien Nährstoffe auf; in der intrazellulären, endophytischen Phase werden den Bakterien oxidativ Nährstoffe entzogen.

Im Bereich der Wurzelspitze werden die Mikroben gezielt durch Ausscheidungen (Exsudate) im Schleimpfropfen von der Pflanze angelockt und regelrecht kultiviert. Dieser Mechanismus scheint nicht auf Pflanzenfamilien beschränkt.

Schließen des N – Kreislaufs

- Fast alle grünen Pflanzen sind mit N₂-fixierenden Bakterien assoziiert (sog. **Assoziativen Diazotrophen**), die auf den unerschöpflichen atmosphärischen N₂ – Pool (78% der Atmosphäre) zugreifen können (Dellagi et al. 2020).
- Voraussetzung für eine signifikante biologische N₂ – Fixierungsleistung durch **assoziative Diazotrophen** ist ein gut aggregierter Boden. Erst in den von Wurzeln und Mykorrhizapilzhyphen versorgten **Bodenaggregaten** herrschen Bedingungen, die essentiell für ein gutes Arbeiten des Nitrogenase Enzymkomplexes sind. (Jones 2018).
- Ein Teil des fixierten N kann von **Mykorrhizapilzen** in die Pflanzenwurzel transferiert werden (Leake et al., 2004; Leigh et al., 2009) oder wird direkt von der Pflanzenwurzel aufgenommen, der andere Teil ist ein wichtiger Beitrag zum Soil Food Web und zur Humusbildung (Jones 2013).

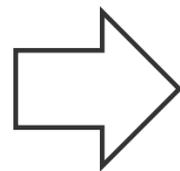
Liquid Carbon Pathway

- In natürlichen, gut funktionierenden, biologisch aktiven Böden werden 80 – 90% der pflanzlichen Nährstoffaufnahme (N, P, K, S, Ca, Mg, und eine Vielzahl an Spurenelementen wie Zink, Kupfer, Bor, Mangan und Molybdän) von riesigen Kolonien an nützlichen Mikroorganismen (Bakterien und Pilzen) aus verschiedenen funktionellen Gruppen herbeigeführt (Jones 2018).
- Pflanzen ernähren und steuern, je nach momentanen Nährstoff-Bedarf, die sie ernährende Mikroorganismenpopulation, indem sie bis zu 40% ihrer Assimilate aus der Photosynthese als ganz individuellen (je nach Art, Alter und Individuum) Wurzelexsudat-Mix bzw. als **liquid carbon** über die Wurzeln in den Boden pumpen (Jones 2018).
- Durch Wurzelexsudate ernährte Mikroorganismen sind essentiell für die voneinander abhängenden Prozesse der **Bodenaggregation** (Bildung von Bodenaggregaten), der **biologischen N₂-Fixierung** (assoziative Diazotrophen), der erhöhten **Makro- und Mikronährstoffverfügbarkeit** (z.B. Fe und P) und der **stabilen C – Sequestrierung** (Jones 2013).

Liquid Carbon Pathway

„Landwirtschaft bedeutet Sonnenlicht zu ernten.“

(Dr. Christine Jones)



d.h., je besser lebende Pflanzenbestände die Sonnenenergie ausnutzen, desto mehr Kohlenstoff wird dem Boden zugeführt und desto stärker profitieren die Mikroorganismen

- a) desto besser ist die pflanzlichen Nährstoffversorgung mit N, P, K, S, Ca, Mg, und einer Vielzahl an Spurenelementen wie Zink, Kupfer, Bor, Mangan und Molybdän,
- b) desto mehr Kohlenstoff kann als mineral-assoziierte organische Substanz langfristig festgelegt werden und
- c) desto besser ist das Bodengefüge (Belüftung/ Gasaustausch, Wasserinfiltration, Wasserhaltekapazität)

Hemmnisse des Liquid Carbon Pathway

- Die Anwendung von Düngemitteln, die große Mengen an anorganischem N enthalten, hemmen bzw. unterbinden die Ernährung der Mikroorganismen (v.a. assoziative Diazotrophen und Mykorrhizapilzen) (Khan et al., 2007; Mulvaney et al., 2009).
- (Intensive) Bodenbearbeitung stört die Struktur von Mikroorganismengesellschaften und hier v.a. das Hyphennetzwerk von Mykorrhizapilzen (Agnihotriab et al. 2022; Sae-Tun et al. 2022).
- Pflanzenschutzmittel haben einen negativen Einfluss auf die meisten pflanzenabhängigen Mikroorganismenpopulation (Jacobsen and Hjelmsø, 2014).

Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaftliche Praxis

1. Die Mikroorganismen füttern

- über den flüssigen Kohlenstoffweg (Liquid Carbon Pathway) durch eine ganzjährige Begrünung des Bodens mit möglichst diversen Pflanzenbeständen
 - Zwischenfrüchten und Untersaaten
 - diverse Fruchtfolge
- eine reduzierte Düngung an anorganischem N ist eine Grundvoraussetzung für hohe Wurzelexsudatausscheidungen

Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaftliche Praxis

1. Die Mikroorganismen füttern

- über den flüssigen Kohlenstoffweg (Liquid Carbon Pathway) durch eine ganzjährige Begrünung des Bodens mit möglichst diversen Pflanzenbeständen
 - Zwischenfrüchten und Untersaaten
 - diverse Fruchtfolge
- eine reduzierte Düngung an anorganischem N ist eine Grundvoraussetzung für hohe Wurzelexsudatausscheidungen

2. Die Mikroorganismen so wenig wie möglich stören

- d.h. keine bzw. minimale Bodenbearbeitung
- d.h. reduzierter Pflanzenschutzmitteleinsatz

Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaftliche Praxis

Die drei Prinzipien der Conservation Agriculture (CA) nach FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations)

- 1. Keine bzw. minimale Bodenbewegung**
(= \leq 25% der Fläche)
- 2. Permanente organische Bodenbedeckung**
(mindestens 30%) mit Zwischenfrucht, Stroh und Lebendmulch
- 3. Artenvielfalt**
(Diverse Fruchtfolgen,
verschiedene Pflanzengesellschaften, Zwischenfrüchte, Untersaaten)

Eine Landwirtschaftliche Praxis, welche die Vielfalt und
Abundanz der Mikroorganismen fördert, stärkt die
ökologischen Funktionen des Bodens und die Resilienz des
Agrarökosystems gegenüber Stressfaktoren.

Resilienz gegenüber Trockenperioden und Starkregenereignissen

- Pflanzen in vielfältigen Pflanzengemeinschaften vernetzen sich durch „Common Mycorrhizal Networks“ (CMNs) und können so Assimilate, Wasser und Nährstoffe austauschen (Johnson and Gilbert 2014).
- Mikroorganismen sind maßgeblich an der Bodenaggregatbildung beteiligt und führen so zu einem günstigerem als auch stabileren Bodengefüge und folglich a) zu einer stark gesteigerten Wasserhaltekapazität sowie b) zu einer stark verbesserten Wasserinfiltration in den Boden (Jones 2013).

Resilienz gegenüber Lücken in der Nährstoffversorgung

- Der Nährstoffkreislauf verbessert sich signifikant, wenn Böden lebendig sind. Es konnte gezeigt werden, dass Mykorrhizapilze bis zu 90% des pflanzlichen N - und P – Bedarfs abdecken können (Smith and Read 2008).
- Die Zusammensetzung der Mikroorganismengemeinschaft im Boden, im Speziellen das Bakterien/ Pilz – Verhältnis hat einen signifikant größeren Einfluss auf den Ertrag als die Konzentration an anorganischem N oder P (Johnson et al., 2015).
- Der Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten zwischen den Marktfrüchten resultierte in besseren Erträgen als die Verwendung von Mineraldünger (Johnson et al., 2015).
- Im Austausch für “liquid carbon” steigern Bakterien - in der Nähe von Pflanzenwurzeln und verbunden mit Pflanzen durch Mykorrhizapilze - die Pflanzenverfügbarkeit von Mineralien und Spurenelementen, welche absolut notwendig für die Gesundheit und Vitalität ihrer Wirte sind (Kaiser et al., 2015).
- Die biologische N₂ – Fixierung durch assoziative Diazotrophen bei Nicht-Leguminosen ist ein bedeutender Baustein für die N-Versorgung von Pflanzenbeständen (Jones 2013).

Resilienz gegenüber Schadorganismen

- Unterdrückung von Schädlingen und Krankheiten als funktionelle Beiträge der Rhizosphäre-assoziierten Mikroorganismen

Folgende **Mechanismen** kommen dabei zum Einsatz (Goswami 2016, Reddy 2013, Lehman et al. 2015):

- Freisetzung von Signalmolekülen („Quorum Sensing“) die eine systemische Resistenz der Pflanzen auslösen (ISR induced systemic resistance),
- Produktion von Antibiotika, Siderophoren und Säuren (z.B. Hydrocyansäuren)
- Ausscheidung von auflösenden Enzymen (z.B. Chitinase, Lipase)
- physische (präventive) Besiedlung von Wurzelgewebe,
- interspezifische Konkurrenz um Ressourcen und
- biologischer Abbau biogener toxischer Substanzen



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!