

# MIT BODENBIOLOGIE HUMUS AUFBAUEN

Die positive Seite einer Krise ist Innovation. Man betrachtet Dinge in einem neuen Licht, versteht sie besser und sucht Lösungen. Manches führt in Sackgassen, anderes aber bringt Verbesserungen und Fortschritt. Mit der Klimakrise rückt der Boden in den Fokus, konkret der Humus. In der Humusforschung hat das zu einem Paradigmenwechsel geführt, der innovativen Wegen in der landwirtschaftlichen Praxis Rückenwind gibt.

Für Humus gab es in der Vergangenheit drei zentrale Begriffe, die unsere Vorstellung vom Abbau der pflanzlichen Biomasse im Boden geprägt haben: Nährhumus, Dauerhumus und Huminstoffe. Das dahinterliegende Paradigma besagte, dass Humusaufbau eine Funktion der chemischen Zusammensetzung

organischer Materialien wäre, welche die Unterschiede in ihrer mikrobiellen Zersetzbarkeit bedingten. Nährhumus war ein Synonym für rasche Mineralisierung von frischem Pflanzenmaterial mit engem C : N-Verhältnis und einfachen organischen Molekülen wie Zuckern, Aminosäuren oder organischen Säuren.

Dauerhumus kodierte komplexe organische Verbindungen, etwa verholzte Pflanzenrückstände, mit hohen Gehalten an Lignin, Suberin oder Cutin, die Mikroorganismen nur schwer und unter hohem Energieaufwand verstoffwechseln könnten und die sich daher im Boden anreicherten. Der Begriff der

ABB. 1: DAS „KONTINUUM-MODELL“ DER HUMUSBILDUNG NACH LEHMANN UND KLEBER

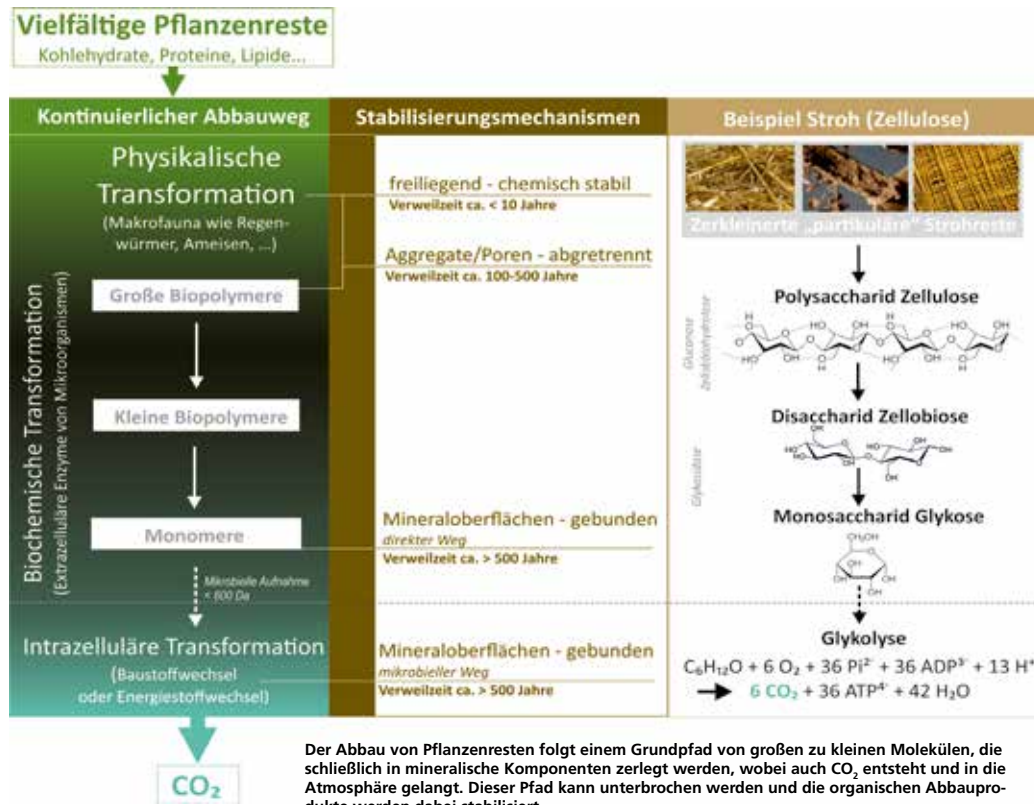


ABB. 2: DIE MIKROBIELLE KOHLENSTOFFPUMPE



Forscher konnten zeigen, dass Bodenmikroben, die lebendig nur einen kleinen Masse-Anteil am gesamten organischen Kohlenstoff im Boden haben, für bis zu 80 % des stabilsten Humus an den Mineraloberflächen verantwortlich sind. (Liang et al. 2017. The importance of anabolism in microbial control over soil carbon storage. Nature Microbiology, 2, 17105)

Huminstoffe fasst eine Stoffgruppe hoch-molekularer und damit sehr stabiler organischer Moleküle zusammen, die mit starken Laugen (pH 13) aus dem Boden extrahiert werden. Ihre Entstehung wurde der Neusynthese aus nieder-molekularen Abbauprodukten organischer Substanzen zugeschrieben und als Humifizierung bezeichnet.

Die praktische Konsequenz dieses Paradigmas, die sich in den gängigen Humusbilanzierungs-Ansätzen widerspiegelt: Humusaufbau erfordert die Zufuhr einer ausreichend hohen Menge schwer abbaubarer organischer Substanzen (mit weitem C : N-Verhältnis) als Dauerhumus-Quellen und hohen „Humusproduktionskoeffizienten“.

### Mikrobiologische Prozesse stehen im Vordergrund

Seit 2010 setzt sich in der Humusforschung ein neues Paradigma durch. Dem „post-chemischen“ Zeitgeist entsprechend (aber damit nicht falsch) und angetrieben durch die Suche nach Möglichkeiten, das rasant ansteigende atmosphärische  $CO_2$  in einer globalisierten Welt auch über Bodenspeicherung zu reduzieren, liegt sein Kern in der Bodenmikrobiologie. Um die Stabilisierung organischer Substanzen im Boden zu erklären, musste man den Fokus von der biochemischen Struktur der Ausgangsstoffe auf die Ereignisse während der (mikro)biologischen Abbauprozesse im Boden selbst verschieben. Im neuen Paradigma sind die derzeit vorherrschenden Begriffe für das Verständnis des „Humus als Ökosystemeigenschaft“: Humuspools, räumliche Trennung, mikrobielle Kohlenstoffnutzungseffizienz und mikrobielle Kohlenstoffpumpe. Die Vorstellung ist in Abbildung 1 dargestellt.

Aus der Vegetation gelangt ein Mix an organischen Stoffen von Spross und Wurzel in den Boden. Schon bei der physikalischen Zerkleinerung von Streustoffen durch Bodenlebewesen (Makrofauna) kann der weitere Abbau unterbrochen werden. Das betrifft vor allem Wurzelrückstände. An der lebenden Wurzel haften über Schleimstoffe (Wurzel- und bakterielle Exsudate) Mineralteilchen an. Stirbt die Wurzel ab, werden Wurzelreste vor weiterem mikrobiellen Ab-

bau „physikalisch geschützt“. In diesem Aggregat-Pool, mit mittleren Verweilzeiten der Organik von ca. 100–500 Jahren, können je nach Boden 40–60 % der organischen Bodensubstanz liegen.

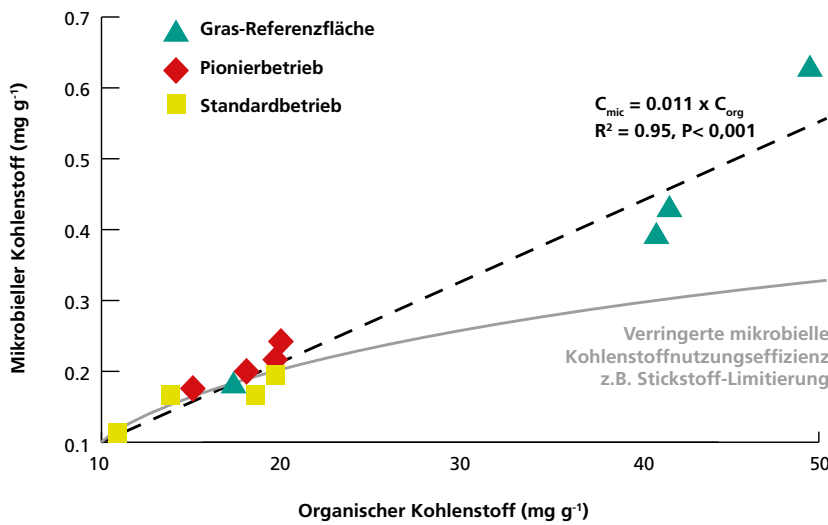
Besonders deutlich wird das neue Humusparadigma bei den „Ton-Humus-Komplexen“. Sie werden heute meist als „mineral-assoziiertes Humuspool“ bezeichnet, da neben Tonteilchen auch andere geladene Mineraloberflächen wie Eisenoxide und -hydroxide eine Rolle spielen. Dieser stabilste Humuspool mit mittleren Verweilzeiten von über 500 Jahren macht zumeist mehr als 50 % der organischen Bodensubstanz aus. Bei seiner Bildung kommt die mikrobielle Kohlenstoffpumpe ins Spiel (Abb. 2).

Während die lebendigen Mikroorganismen (gemessen als mikrobieller Kohlenstoff) nur etwa 0,9–1,2 % des organischen Kohlenstoffs im Boden ausmachen, konzentrieren sich ihre Leichenteile (Nekromasse: Zellwandbestandteile, DNS-Bruchstücke, Aminosäure) an den Mineraloberflächen auf bis zu 80 % des dort stabilisierten Kohlenstoffs. Der Lebensraum der Bodenbakterien in Wasserfilmen, die die Mineralteilchen benetzen, bedingt wohl auch die Nähe zu ihren „Särgen“ an den geladenen Mineraloberflächen. Neben der mikrobiellen Quelle des mineral-assoziierten Humuspools tragen aber auch (geladene) wasserlösliche Kohlenstoffmoleküle wie organische Säuren aus der Wurzel-exsudation direkt zum Aufbau dieses Pools





**ABB. 3: DIE MIKROBIELLE BIOMASSE WÄCHST MIT DEM ORGANISCHEN KOHLENSTOFF IM BODEN**



Leicht verwertbarer Kohlenstoff ist in Ackerböden für das mikrobielle Wachstum zumeist der limitierende Nährstoff. Die Effizienz der mikrobiellen Kohlenstoffnutzung für Wachstum kann aber bei Mangel anderer Nährstoffe (wie Stickstoff) zurückgehen (graue Linie). Es wird dann mehr Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> veratmet. In Untersuchungen auf österreichischen Ackerflächen und natürlichen Vergleichsflächen konnten aber selbst bei hohen Gehalten an organischem Boden-Kohlenstoff noch keine Hinweise gefunden werden, dass die mikrobielle Biomasse durch andere Faktoren wie Stickstoff limitiert war – sie stieg weitgehend linear mit dem organischen Kohlenstoff.

bei, wenn sie nicht vorher bereits durch den Magen der Rhizosphären-Mikroben gehen.

Natürlich gibt es auch teilzersetzte Pflanzenreste, die einem freiliegenden Humuspool zugerechnet werden. Der Anteil dieses Pools liegt bei etwa 4–8% der organischen Bodensubstanz. Hier spielt die chemische Stabilität tatsächlich eine Rolle für die Verweilzeit, die aber generell unter 10 Jahren liegt. Besonders, wenn Mikroorganismen genügend einfach zu verstoffwechselbare Futteralternativen haben, investieren sie kaum in energieaufwändige Enzymproduktion, um diese komplexen Substratquellen zu nutzen. Auch die Nährstoffverhältnisse (v.a. C : N) in verholzten Pflanzenresten (Stroh ≈ 100 : 1) sind weit von der mikrobiellen Körperzusammensetzung entfernt (C : N ≈ 7–15 : 1). Es müsste erst „überschüssiger“ Kohlenstoff als CO<sub>2</sub> veratmet werden, um das Nährstoffangebot an die Baustoff-Bedürfnisse für Wachstum anzupassen. Alternativ können die Mikroorganismen auch Stickstoff-Quellen – in Ackerböden meist ausreichend vorhanden – suchen, um die Verhältnisse ins Gleichgewicht zu bringen (Abb. 3). Das kann positiv sein, wenn damit temporäre Nitratüberhänge auf nicht bewachsenem Boden in organischer Form in der

mikrobiellen Biomasse zwischengespeichert werden (Immobilisierung). Es kann aber auch negativ sein, wenn der stabile Humus (mit einem C : N ≈ 10 : 1, also dem mikrobiellen Verhältnis entsprechend) als N-Quelle herhalten muss (N-Mining) und der entsprechende Kohlenstoff dabei zu CO<sub>2</sub> veratmet wird.

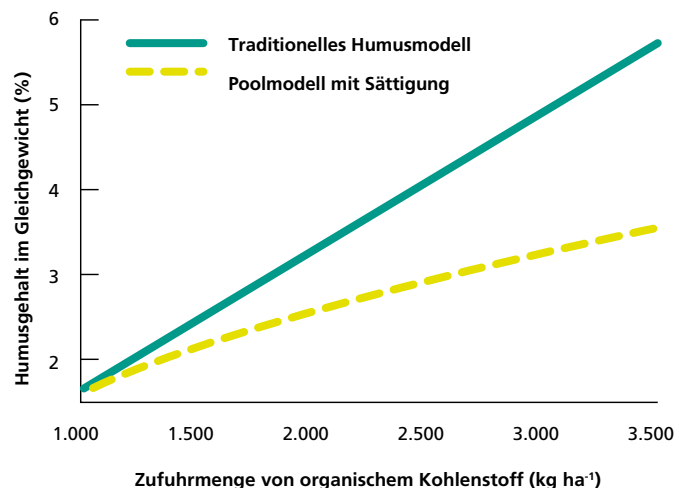
### Humusaufbau „revisited“

Die neue Humusforschung war und ist sicher von der Euphorie getragen, dass Landwirte als „Humusbauern“ das Klima über die Kohlenstoffsénke Boden retten können. Mit 4 Promille pro Jahr Steigerung wären die anthropogenen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Boden abgefangen, so die gleichnamige Initiative aus der Klima-Konferenz in Paris 2015. Der Markt für Zertifikate floriert mit entsprechendem Enthusiasmus.

Jedoch sind es gerade die Erkenntnisse aus der neuen Humustheorie, die vor einer einseitigen „Klimazentrierung“ als Motivation für Humusaufbau warnen. Geht man von der chemischen Stabilität als zentralen Faktor für den Humusaufbau aus, könnte man anteilmäßig zur Inputmenge bei entsprechend hohem Humusreproduktionsfaktor (also weites C : N) Humus anreichern. Vom Klimastandpunkt aus würde die Devise lauten: je höher und zäher der Input, desto besser. Die neue Pooltheorie mahnt aber zu Vorsicht. Denn die klimarelevanten stabilen Pools haben eine Sättigungsgrenze (Abb. 4).

Irgendwann sind die Mineraloberflächen bedeckt, die Aggregate voll und die Mikroorganismen geraten vor lauter Kohlenstoff aus dem Gleichgewicht. Keine Frage, in Ackerböden kann man Luft nach oben ver-

**ABB. 4: HUMUSGEHALTE IM „GLEICHGEWICHTSZUSTAND“ (KOHLENSTOFF-MINERALISIERUNG ZU CO<sub>2</sub> = KOHLENSTOFFZUFUHR) IN ABHÄNGIGKEIT DER ZUFUHRMENGE**



Aus der traditionellen Sicht würde man bei biochemisch stabilen Kohlenstoffquellen eine theoretisch unlimitierte Humusgehaltssteigerung erwarten können. Die stabilen Speicher-pools im Boden (Aggregate, Mineraloberflächen) haben jedoch eine Sättigungsgrenze. Danach kann nur noch der relativ instabile freiliegende Humuspool angefüllt werden.

muten – leider sind die Daten dazu noch sehr spärlich. Aber ist erst die Sättigung erreicht, reichert sich Kohlenstoff nur mehr im freiliegenden Pool an, der keiner Sättigungsgrenze unterliegt. Nur ist dieser eben mit seiner mittleren Verweilzeit von unter 10 Jahren kaum klimarelevant.

### Managementfokus in der neuen Humustheorie

Damit soll der Idee des Humusaufbaus für den Klimaschutz nicht der Wind aus den Segeln genommen werden, denn fraglos ist ein Beitrag möglich. Es scheint aber ohnehin wenig realistisch, dass Zertifikatshandel oder Ausgleichszahlungen zu einer ausreichend hohen Zahl an „Klimawirten“ führen. Motivationen für Humusaufbau bei Landwirten sind vielmehr Erwartungen in höhere Bodenfruchtbarkeit und bessere Anpassung an Klimawandelfolgen wie Trockenheit. Gerade für die Optimierung dieser Bodenfruchtbarkeits-Funktionen bietet die neue Humustheorie spannende Ansätze für die Praxis.

Die Bodenstruktur über minimierte Bearbeitungsintensität zu optimieren, ist eine seit langem, besonders für Trockengebiete und in Erosionslagen, empfohlene Praxis. Aus Humus-Sicht wird dadurch der in Aggregaten liegende (Wurzel-)Kohlenstoff geschützt. Auch das natürlich gewachsene Porensystem mit einem Mix aus verwinkelten Fein-, Mittel- und Grobporen bleibt erhalten und damit organisches Material von den mikrobiellen Zersettern räumlich getrennt. Besonders nach den hitzigen Debatten um Humusaufbaupotenziale durch Minimalbodenbearbeitung sollte besonders in Sachen Bodenbearbeitung der Blick aber unbedingt von der Klima- auf die Bodenfruchtbarkeitswirkung gewendet werden. In diesem Zusammenhang



## i Bodenlebewesen als Grundlage für Bodenfruchtbarkeit

10 Millionen bis 1 Milliarde Bakterien aus 4.000-50.000 Arten und 100.000–1 Million Pilze aus mehr als 3.000 Arten pro Gramm Boden sind die Grundlage der Bodenfruchtbarkeit. Sie wollen in gut strukturierter Umgebung wachsen und sich vermehren. Unterstützen wir sie in ihrer Vielfalt und Lebensvitalität, dann ernten wir ihre ertragsrelevanten Agrarökosystemleistungen, wie natürliche Nährstoffnachlieferung, optimale Erschließung der Bodenressourcen inklusive Wasser durch Pflanzenwurzeln und gesunde Nutzpflanzen. Und darüber hinaus unterstützen die Bodenlebewesen die Gesellschaft auch noch mit klimaschützendem Humusaufbau.



haben Schweizer Forscher einen interessanten Humuswert definiert, der eine optimale Bodenstruktur als Ziel hat. Dieser liegt bei einem  $C_{org}$ :Ton-Verhältnis von 0,1. Bei dieser Methode wird das Verhältnis von Humus zu Ton herangezogen als eine interne Bezugsgröße, die hilft den erreichbaren Humusgehalt abzuschätzen. Dabei wird dieses Humusbindungspotenzial wie folgt definiert: Sind die Tonminerale des Bodens mit Humus belegt, wird ein Massenverhältnis  $C_{org}$ :Ton von 0,1 erwartet d.h. zehn Gramm Ton binden ein Gramm  $C_{org}$  oder 1,7 Gramm Humus. In Humusgehalten ( $Humus = 1,72 \times C_{org}$ ) hieße das: ein leichter Boden (15 % Ton) sollte etwa 2,6 %, ein mittlerer Boden (25 % Ton) 4,3 % und ein schwerer Boden (35 % Ton) 6 % Humus haben, um eine optimale Struktur zu sichern (Rechenbeispiel leichter Boden:  $1,72 \times 15 \% = 0,258 \times 10 \text{ Gramm Ton} = 2,58 \%$ ).

Eine Minimierung der mechanischen Bearbeitungsintensität ist auch für die Schonung der Bodenpilze wichtig. Denn gerade das Hyphengeflecht der Pilze ist für fruchtbare, struktur-stabile Böden entscheidend. US-amerikanische Versuche konnten im Mittel über sechs

Standorte zeigen, dass bei Direktsaat der Anteil der Pilze an der mikrobiellen Biomasse um 62 % höher war als bei Pflugeinsatz.

### Ziel: Biodiverses Immergrün-System

Das bessere Verständnis der Mikrobiologie im Humushaushalt bringt gerade hinsichtlich des Bodenlebens wichtige neue Praxishinweise. Je besser das Futter für die Bodenmikroben – also wenig Energieaufwand für das Aufbrechen der Kohlenstoffverbindungen und passende Nährstoffverhältnisse – desto mehr Wachstum der mikrobiellen Biomasse (Baustoffwechsel) und weniger  $CO_2$ -Veratmungsverluste (Energistoffwechsel). Dieses Verhältnis, die mikrobielle Kohlenstoffnutzungseffizienz zu optimieren, sollte ein Fokus eines bodenfruchtbarkeitszentrierten Humusmanagements sein. Neben einer aggregat-, poren- und pilzschonenden Bearbeitung ist der Schlüssel dafür ein „biodiverses Immergrün-System“. In diesem System liefern lebende Pflanzen über möglichst lange Zeit für Mikroorganismen optimal verwertbare Kohlenstoffinputs über die Wurzeln. Dies ist fraglos nicht immer und überall in dieser „Radikalität“ umzusetzen. Dennoch bieten diverse Zwischenfrüchte, Begleit- und Untersaaten, neben der Zahl an Kulturarten in der Fruchtfolge, geeignete Bausteine für innovative Ackerbausysteme im Sinne der neuen Humustheorie. —

Priv. Doz. DI  
Dr. Gernot Bodner  
Tulln  
Fon +43 147654 95115

