

Humus im Boden und seine Bedeutung für das Ökosystem

von
G. Miehlich



Institut für Bodenkunde



Universität Hamburg

www.geowiss.uni-hamburg.de/i-boden/publrel.htm

© Dies ist die erweiterte Fassung eines Vortrags beim Verband Humus- und Erdenwirtschaft, Region Nord e.V. am 26.09.07 in Ratzeburg.

Der Inhalt wird zur Information der Teilnehmer zur Verfügung gestellt. Es wurden teils Grafiken und Tabellen anderer Autoren verwendet, die im Text zitiert sind. Alle übrigen Bilder, Grafiken und Tabellen stammen vom Autor. Eine Weiterverwendung dieser Unterlage ist nur mit Zustimmung des Autors (g.miehlich@ifb.uni-hamburg.de), bei Fremdbeiträgen der Autoren bzw. Verlage möglich.

Themen

Nach einer kurzen Einleitung möchte ich drei (scheinbar) einfache Fragen beleuchten:

Was ist Humus?

Welche Faktoren beeinflussen den Humusgehalt eines Bodens?

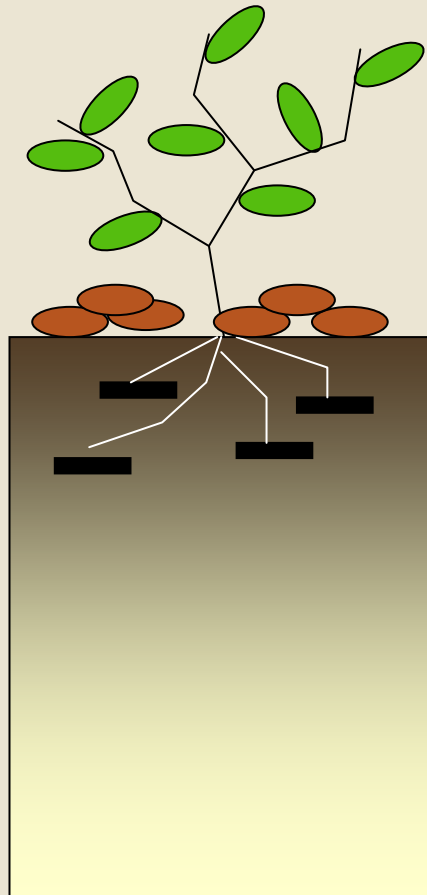
Welche Wirkungen hat Humus auf das Ökosystem?

und das in 20 Minuten??

Einleitung



Wie alle ordentlichen Naturwissenschaften gründet die Bodenkunde auf Aristoteles: die Humustheorie



Die Pflanze stirbt ab.
Aus den abgestorbenen Resten
bildet sich Humus,
der die Pflanze ernährt

schön
aber leider falsch

Einleitung

Auch ca. 2400 Jahre später sind die Rätsel des Humus noch nicht gelöst:

Aus dem Vorwort des Buchs Huminstoffe von Wolfgang Ziechmann (1980):

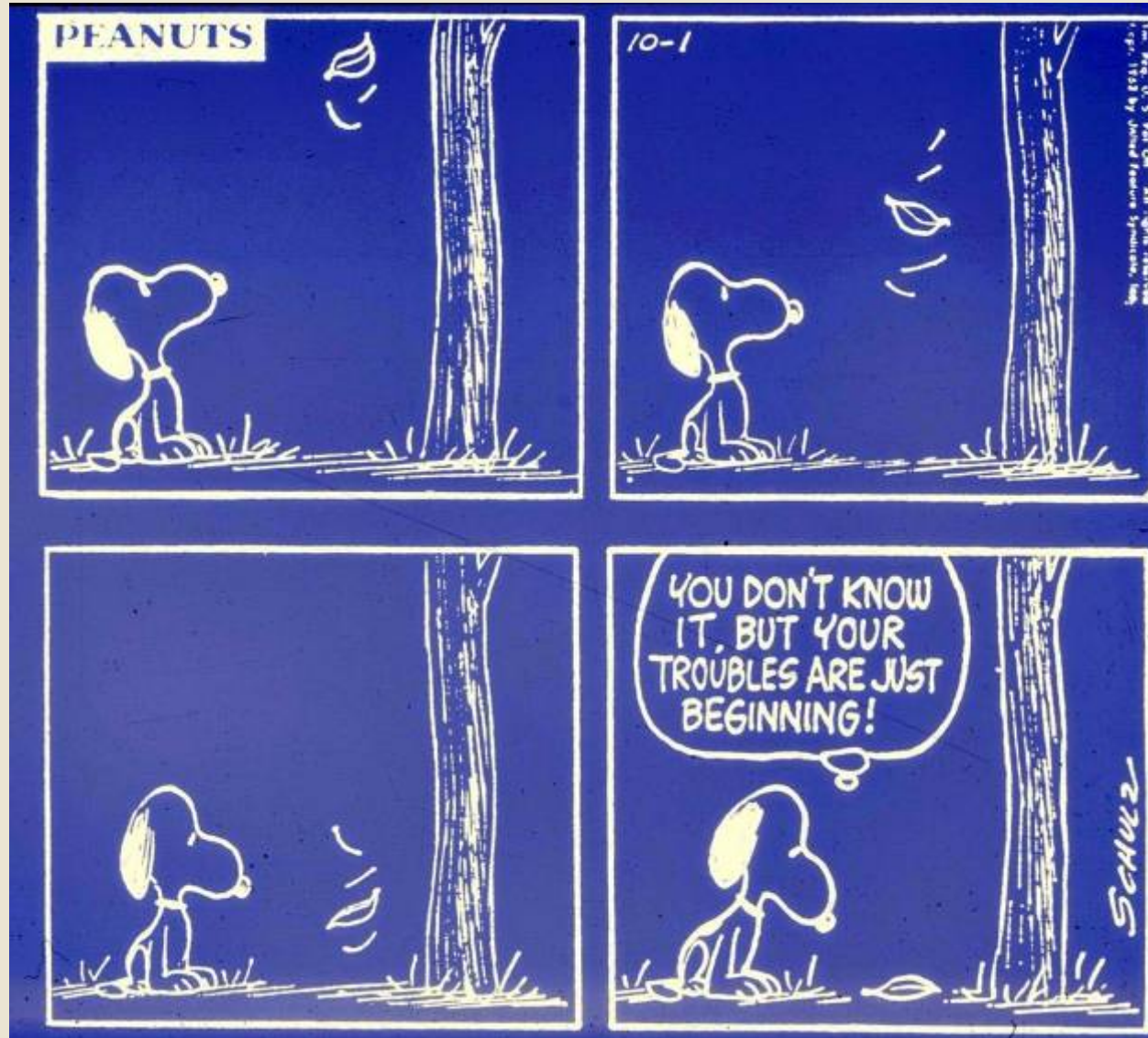
„Huminstoffe werden kaum das Entzücken der Chemiker oder Physiker hervorrufen; sie sind aus dem Katalog der beschäftigungswürdigen Substanzen ausgegliedert; man ignoriert sie ...

Huminstoffe haben selbst wesentlichen Anteil an einer solch ablehnenden Haltung der Wissenschaftler. Man kann sie nur mit Schwierigkeiten unverändert gewinnen und reinigen, ihre Definition allein kann schon nachhaltige Verwirrung schaffen und man kann sie kaum überzeugend einordnen.

Andererseits haben Huminstoffe bestimmte, beachtlich konstante Eigenschaften. Ihre Zierde ist ihre braune Farbe, die sie immerhin mit nur wenigen definierten oder undefinierten Substanzen gemein haben. Gewisse Anteile der Huminstoffe sind Säuren, allerdings verhältnismäßig schwache Säuren; andere wieder Reduktionsmittel (es gibt wirkungsvollere anderswo), Huminstoffe beteiligen sich an Elektronenübergängen, aber auch dies können andere Substanzen weit besser. Huminstoffe vermögen manches, jedoch immer nur mit mäßigem Erfolg.“

Einleitung

So gilt weiterhin:



Charles Schulz 1962

Was ist Humus?

Begriffsbestimmungen

Humus: (hier) die Gesamtheit aller nicht-belebten organischen Verbindungen eines Bodens

Humus besteht aus:

Streu: organische Substanz des Bodens, die in ihrem Aufbau die Herkunft von Organismen erkennen lässt: abgestorbene Reste von Pflanzen wie z.B. Blätter, Nadeln, Zweige, Wurzeln; Kadaver der Bodentiere; Reste von Mikroorganismen.

Huminstoffe: aus Streustoffen durch biotische oder abiotische Prozesse im Boden neu gebildete organische Verbindungen. Sie sind häufig braun bis schwarz gefärbt. Außer als Feststoffe treten Huminstoffe auch gelöst auf.

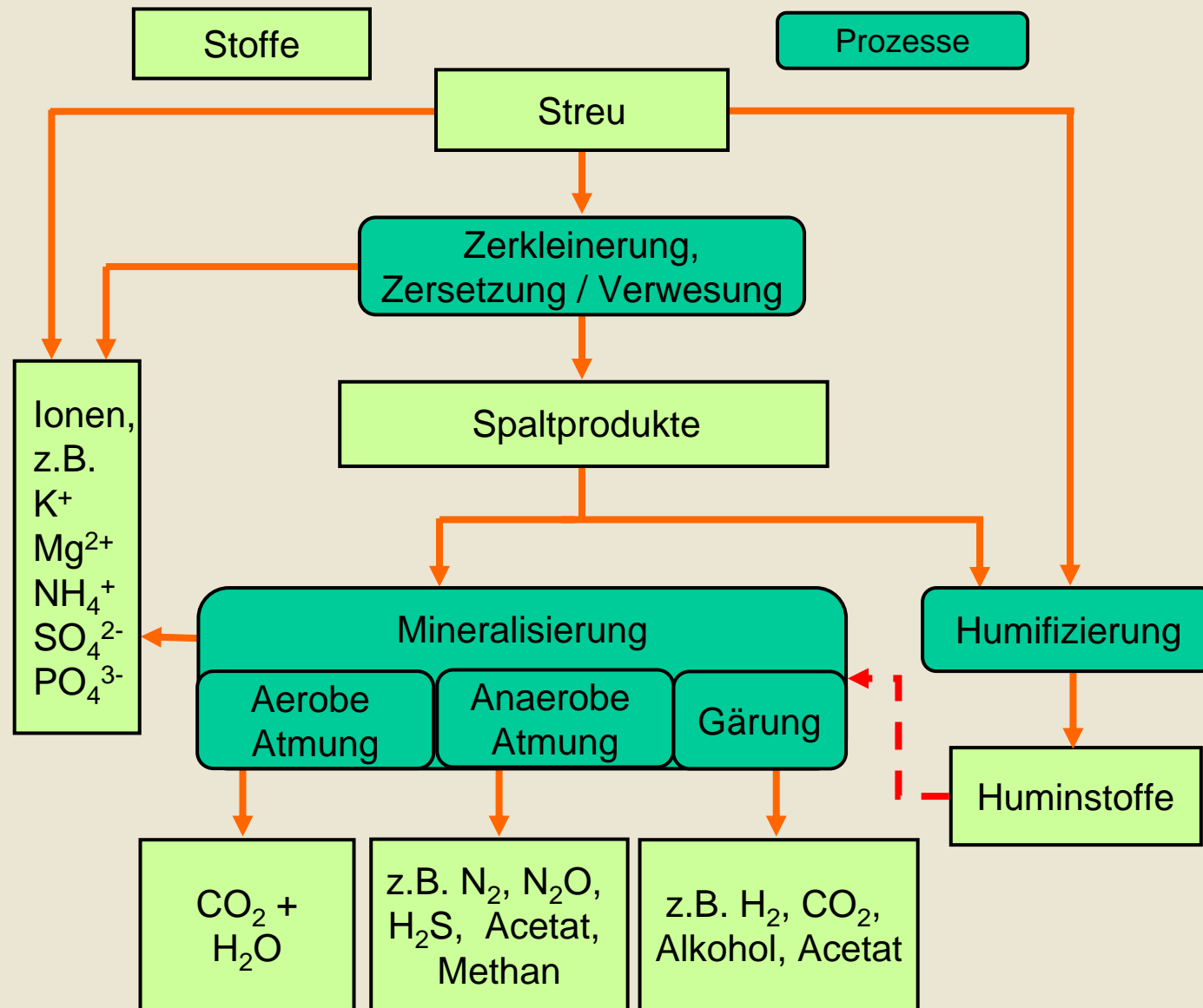
Xenobiotica: organische Verbindungen im Boden, die vom Menschen hergestellt wurden und absichtlich (z.B. Pflanzenschutzmittel) oder unbeabsichtigt (z.B. die aus Verbrennungsprozessen stammenden polyzyklischen Kohlenwasserstoffe) in den Boden eingebracht wurden.

Kohlige Substanzen: meist schwarze organische Verbindungen (black carbon) im Boden, die entweder aus dem Ausgangsgestein stammen (z.B. Braunkohle) oder durch unvollkommene Verbrennung (z.B. Kraftwerksaschen, Köhlerei) oder bei natürlichen Bränden entstanden sind.

Wir beschäftigen uns hier nur mit Streu- und Huminstoffen.

Was ist Humus?

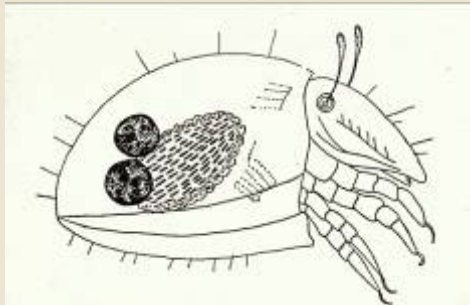
Transformation der organischen Substanz



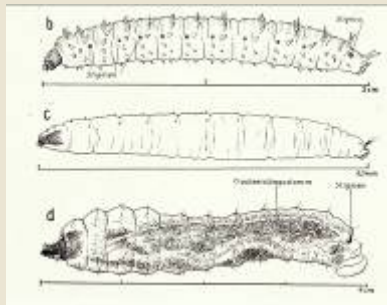
Nach der Zerkleinerung der Streu durch Bodentiere spalten Mikroorganismen die Makromoleküle der Streu zu einfachen organischen Verbindungen. Der größte Teil dieser Spaltprodukte wird mikrobiell unter Energiegewinn zu anorganischen oder einfachen organischen Verbindungen weiter abgebaut (Mineralisierung). Der Rest wird in Huminstoffe umgewandelt (Humifizierung). Während der Streuzersetzung werden Ionen in die Bodenlösung abgegeben.

Was ist Humus?

Zerkleinerung der Streu durch Bodentiere



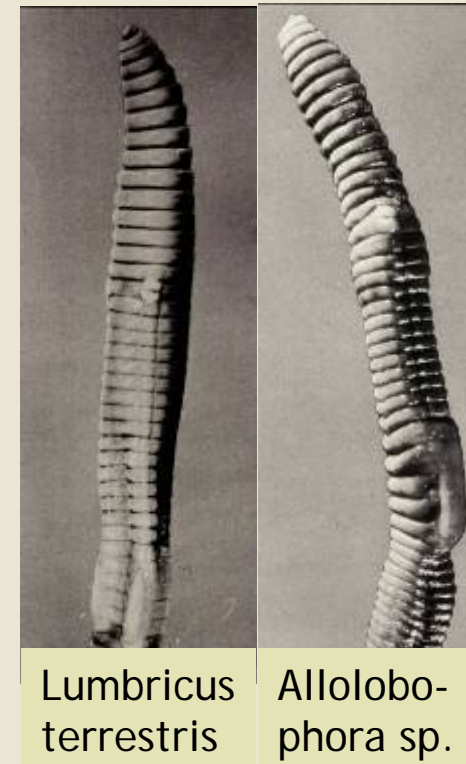
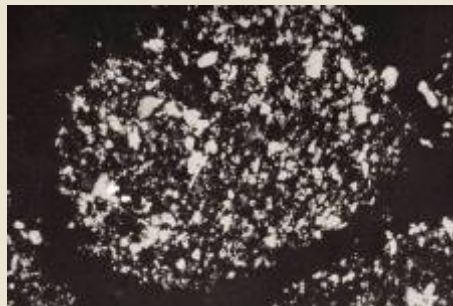
Hornmilben leben in und vom Inneren von Nadeln



Zweiflüglerlarven zersetzen Streureste nur sehr unvollständig.
Die Kotpartikel sind Nahrung für andere Bodenorganismen.



Saftkugler mischen organische und mineralische Bodensubstanz



Lumbricus
terrestris

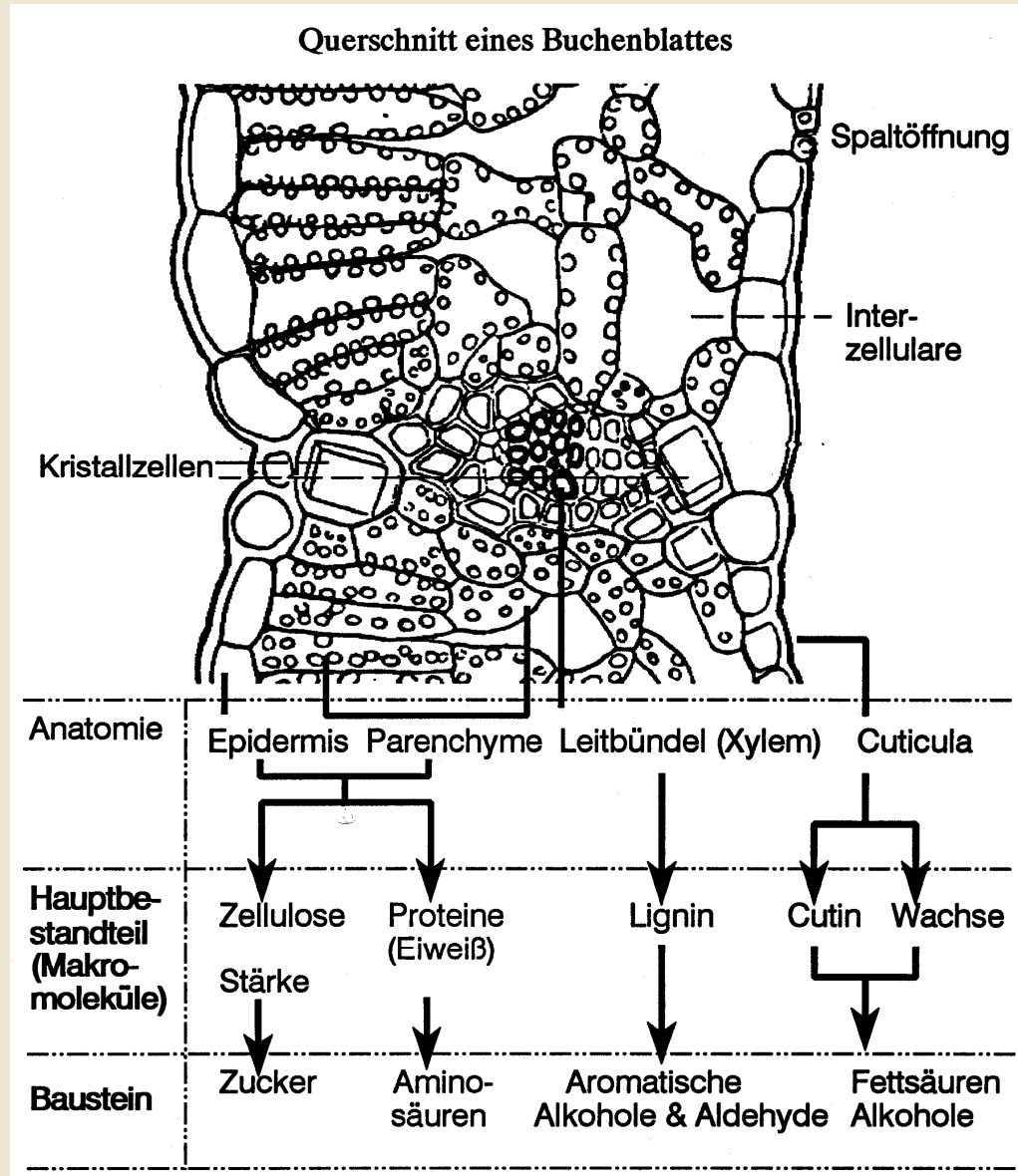
Allolobo-
phora sp.

Die Streuzerkleinerung erfolgt
über eine komplizierte und
standortangepasste Zersetzer-
kette.

Babel, Eisenbeis u. Wichard, Graff

Was ist Humus?

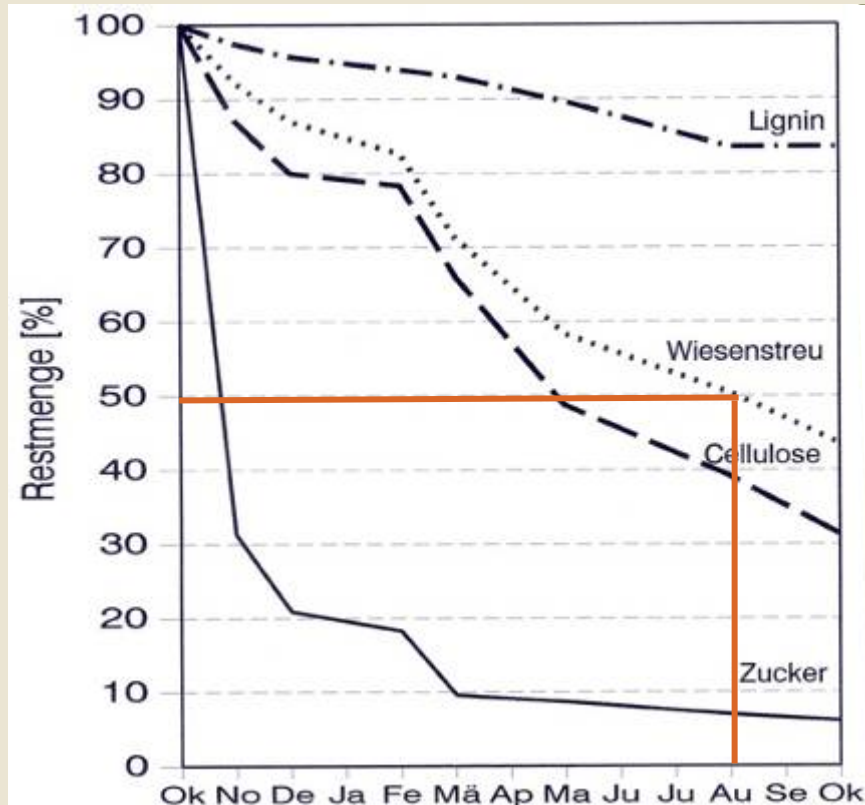
Mikrobielle Streuzersetzung



Die Zellen der Streu enthalten, je nach anatomischer Funktion, unterschiedliche Stoffe, die meist Makromoleküle sind (z.B. Cellulose, Hemicellulose, Stärke, Proteine, Lignin, Cutin). Mikroorganismen bauen diese Stoffe ab, indem sie stoffspezifische Enzyme abgeben, die die Makromoleküle der Streu in ihre Bausteine (z.B. Zucker, Aminosäuren, aromatische Verbindungen, Fettsäuren) spalten. Während Cellulose und Proteine v.a. durch Bakterien abgebaut werden, wird das Lignin v.a. durch Enzyme gespalten, die von Pilzen stammen. Der größte Teil der Spaltprodukte der Streuzersetzung wird von Mikroorganismen aufgenommen und veratmet oder zum Aufbau der körpereigenen Stoffe verwendet.

Was ist Humus?

Verlauf des Streuabbaus



Gisi 1987

Zur Kennzeichnung der **Abbaurrate** kann man Streumaterial in Netzen in den Boden einbringen und nach der Versuchszeit Gewicht und Zusammensetzung der verbleibenden Reste bestimmen.

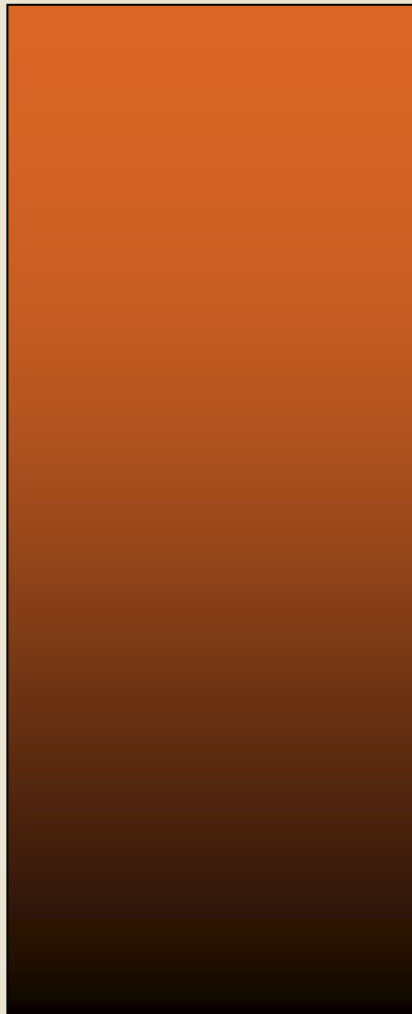
In unserem Fall, einer Wiese auf einer sauren Braunerde, ist nach ca. 300 Tagen (Oktober bis August des folgenden Jahres) die Hälfte der Streu zersetzt.

Die verschiedenen Bestandteile der Streu werden unterschiedlich schnell abgebaut. **Zucker**, die direkt veratmet werden können, werden noch im Herbst weitgehend mineralisiert, während die **Cellulose**, die zuvor in Zucker gespalten werden muss, deutlich langsamer abgebaut wird. Das in der Wiesenstreu in geringer Menge enthaltene **Lignin** bleibt nach einem Jahr zu mehr als 80 % unzersetzt. Die Plateaus innerhalb der Kurven gehen auf die tiefen winterlichen Temperaturen zurück, bei denen die Streuzersetzung weitgehend zum Erliegen kommt.

Was ist Humus?

Zersetzbarkeit des Humus

Die Humusbestandteile lassen sich grob in Fraktionen unterschiedlicher Zersetzbarkeit gliedern. Die Anteile variieren in Abhängigkeit von Bodeneigenschaften und Vegetation stark.



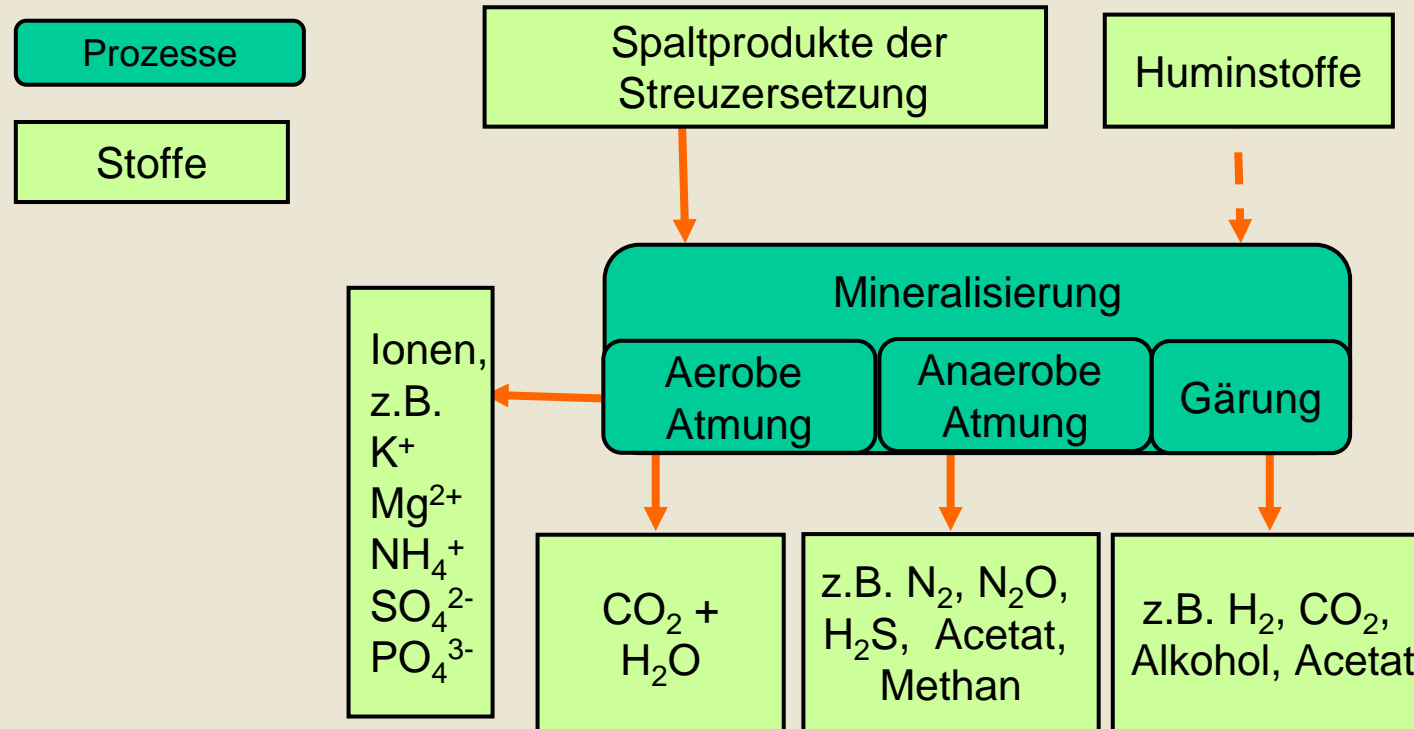
labil: leicht zersetzbare Pflanzenreste, Mikroorganismen. Zersetzung innerhalb von Monaten bis wenigen Jahren, 1-5 % der organischen Substanz

intermediär: schwer zersetzbare Streureste, physikalisch stabilisierte Huminstoffe. Zersetzung in 10 - 50 Jahren, in Ackerböden ca. 50 % der org. Subst.

inert: organomineralische Verbindungen, black carbon. Praktisch unzersetzbar

Was ist Humus?

Mineralisierung 1



Die Mineralisierung ist der mikrobielle, über mehrere Stufen ablaufende Abbau von organischen Verbindungen zu anorganischen (z.B. CO_2 , N_2 , H_2O , S^{2-}) oder einfachen organischen Stoffen (z.B. Acetat, Methan). Die Mikroorganismen gewinnen durch die mit der Mineralisierung verbundenen Redoxreaktionen Energie, die sie z.B. für das Wachstum der Zellen, die Bewegung u.a. benötigen. An der Mineralisierung ist eine große Zahl von Mikroorganismen mit spezifischen Leistungen beteiligt. Je nach Sauerstoffgehalt und Stoffbestand wird der Mineralisierungsprozess als aerobe Atmung, anaerobe Atmung oder Gärung bezeichnet.

Was ist Humus?

Mineralisierung 2

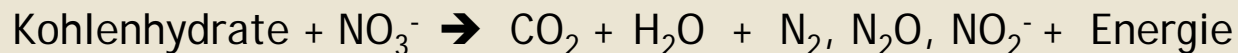
Die folgende Übersicht kann nur als grobes Schema verstanden werden. Zu Details siehe Lehrbücher der Mikrobiologie.

Aerobe Atmung: In belüfteten Bodenhorizonten (aerobes Milieu) werden Kohlenhydrate (z.B. Glucose) zu CO_2 oxidiert und Luftsauerstoff zu Wasser reduziert:

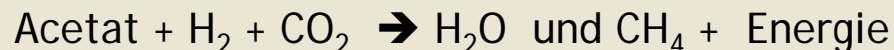


Anaerobe Atmung: Unter sauerstofffreien Bedingungen (teilweise oder vollständig wassergesättigte Bodenhorizonte) können Spezialisten unter den Mikroorganismen anorganische Verbindungen wie Nitrat, Sulfat, Eisen- und Manganoxide oder einfache organische Verbindungen zur Reduktion nutzen. Als Beispiele werden hier die Nitratatmung und die Methanogenese beschrieben.

Nitratatmung (Denitrifikation): Bei der Nitratatmung wird Nitrat zu gasförmigen Stickstoffverbindungen reduziert, was mit einem Verlust an pflanzenverfügbarem Stickstoff verbunden ist. Lachgas (N_2O) trägt zum Treibhauseffekt bei:



Methanogenese: In streng anaeroben Milieu (z.B. in humushaltigen Schlämmen, Schlickern und Mooren) können Archaeobakterien (u.a.) Acetat, Wasserstoff und CO_2 zu Methan und Wasser umsetzen. Das Gasgemisch aus Methan und CO_2 wird als Bio- oder Sumpfgas bezeichnet aus dem durch Verbrennung Energie gewonnen werden kann. Methan, ist ein klimarelevantes Spurengas, das 21 mal stärker zur globalen Erwärmung beiträgt als Kohlendioxid:



Was ist Humus?

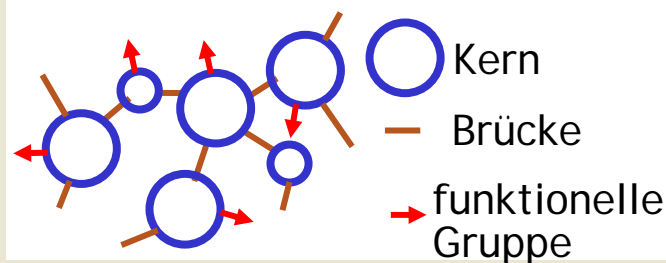
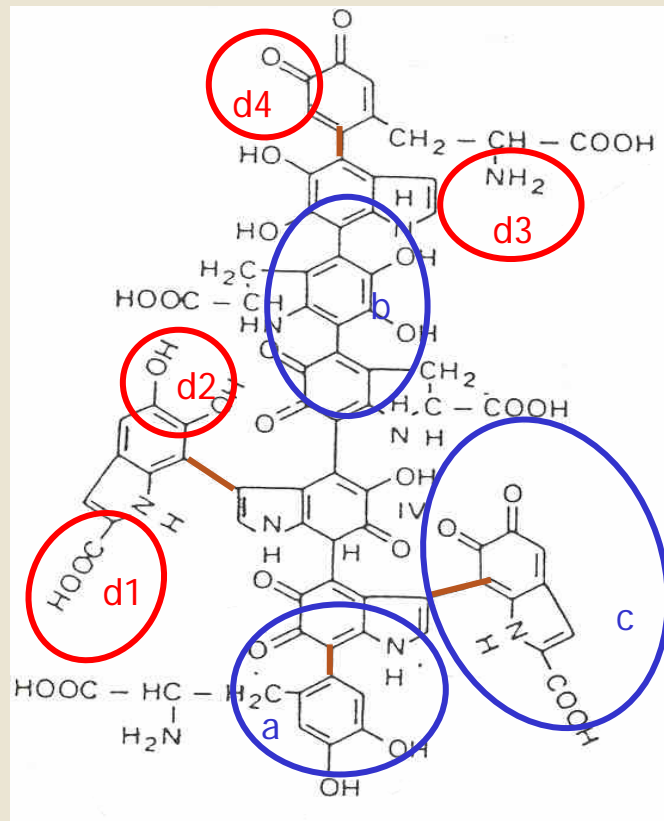
Mineralisierung 3

Gärung: Ebenfalls unter streng anaeroben Bedingungen gewinnen hochspezialisierte Mikroorganismen Energie durch Gärungsprozesse. Bei der Gärung werden im Gegensatz zur anaeroben Atmung sowohl für die Oxidations- als auch für die Reduktionsreaktionen organische Verbindungen benutzt. Es gibt eine große Zahl unterschiedlicher Gärungsprozesse (die weitaus beliebteste ist die alkoholische). Bei Gärungen im Boden entstehen u.a. Acetat, verschiedene Alkohole, CO_2 , H_2 , die ihrerseits Ausgangsprodukte für die Methanogenese sind.

Freisetzung von Ionen: Im Verlauf der Streuzersetzung und Mineralisierung werden die in der Streu gebundenen Nährstoffe in Ionenform (v.a. NH_4^+ , PO_4^{3-} , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-}) an die Bodenlösung abgegeben. Sofern sie nicht unmittelbar von den höheren Pflanzen aufgenommen werden können (z.B. im Winter), können sie nur vor der Versickerung ins Grundwasser bewahrt werden, wenn im Boden genügend Austauscher (Tonminerale, Humus, Eisenoxide) vorhanden sind.

Was ist Humus?

Humifizierung, Aufbau der Huminstoffe



hypothetischer Ausschnitt und Schema eines Huminstoffmoleküls

Humifizierung ist die Bildung von Huminstoffen aus Spaltprodukten der Streu. Huminstoffe bestehen vor allem aus aromatischen Verbindungen (Verbindungen mit einem Benzolkern), die bei der Zersetzung von Lignin entstehen und Abbauprodukten aus Proteinen und Cellulose. Huminstoffe haben eine sehr komplizierte und sehr variable chemische Struktur.

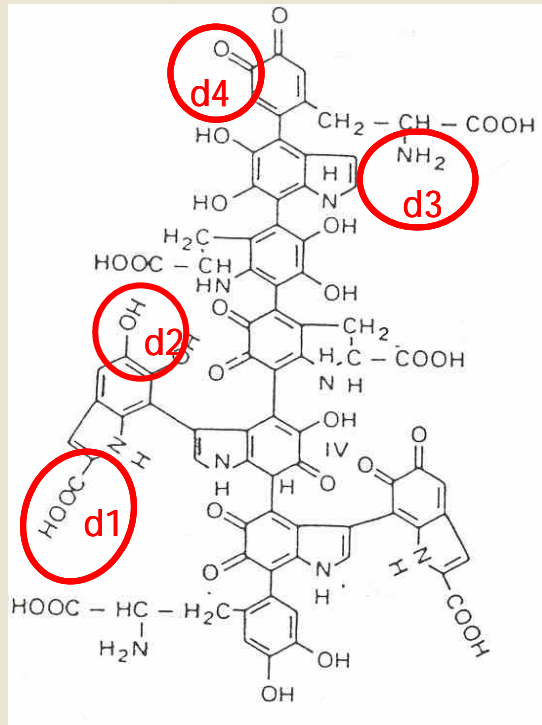
Gemeinsam ist ihnen das Bauprinzip aus **Kernen** bestehen, z.B. substituierte Benzole (a), bi- und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (b), heterozyklische aromatische Verbindungen (c), die über **Brücken** untereinander verbunden sind. Die Kerne enthalten **funktionelle Gruppen**, die wesentlich die Eigenschaften der Huminstoffe bestimmen (d, vgl. folgende Folie). In die Huminstoffmoleküle ist Wasser eingelagert. Sie können mit anorganischen Stoffen (v.a. Tonmineralen) sehr stabile **organomineralische Verbindungen** bilden.

Bei neutralem bis schwach saurem pH-Wert des Bodens sind Bodentiere und Bakterien stark an der Huminstoffbildung beteiligt (biotische Humifizierung). Bei sehr sauren Böden ist die Huminstoffbildung ein überwiegend abiotischer Prozeß unter Beteiligung von Pilzen.

Autor der hypothetischen Formel: unbekannt

Was ist Humus?

Bedeutung funktioneller Gruppen der Huminstoffe



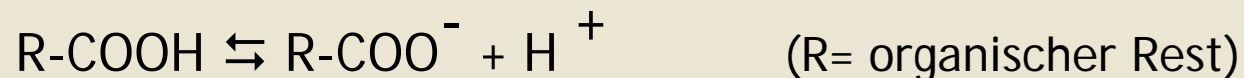
Funktionelle Gruppen sind Bestandteile organischer Verbindungen, die polare Atombindungen besitzen. An diesen Stellen treten die Huminstoffe in Wechselwirkung mit Feststoffen oder den Ionen der Bodenlösung. Die wichtigsten funktionellen Gruppen der Huminstoffe sind:

- Carboxylgruppen (-COOH, d1)
- phenolische und alkoholische Hydroxylgruppen (-OH, d2)
- Aminogruppen (-NH₂, d3)
- Carbonylgruppen (>C=O, d4).

Funktionelle Gruppen der Huminstoffe wirken als:

- Säure bzw. Base, Kationen- und Anionentauscher (unspezifische Adsorption) und Spezifische Adsorber für Nähr- und Schadstoffe.

Z.B. reagiert die Carboxylgruppe nach der vereinfachten Formel:



das heißt, ein Teil der Carboxylgruppen ist dissoziiert und bildet dabei negativ geladene Austauschplätze ⁻ und Säure H^+ .

Was ist Humus?

Eigenschaften der Huminstoffe

Merkmal	Fulvosäuren	Huminsäuren	Humine
Farbe	gelb-gelbbraun	braun-grauschwarz	variabel
Molmasse [g]	800 – 9.000	10.000 – 100.000	variabel
Stickstoffgehalt [%]	0,5 – 2,0	4 – 8	variabel
KAK* [mmol _C /kg]	5.000 – 7.000	3.000 – 5.000	< 3.000
Säurestärke	hoch	mittel	sehr gering
Bildung organ. Metallkomplexe	sehr hoch überw. gelöst	mittel überwieg. fest	gering fest

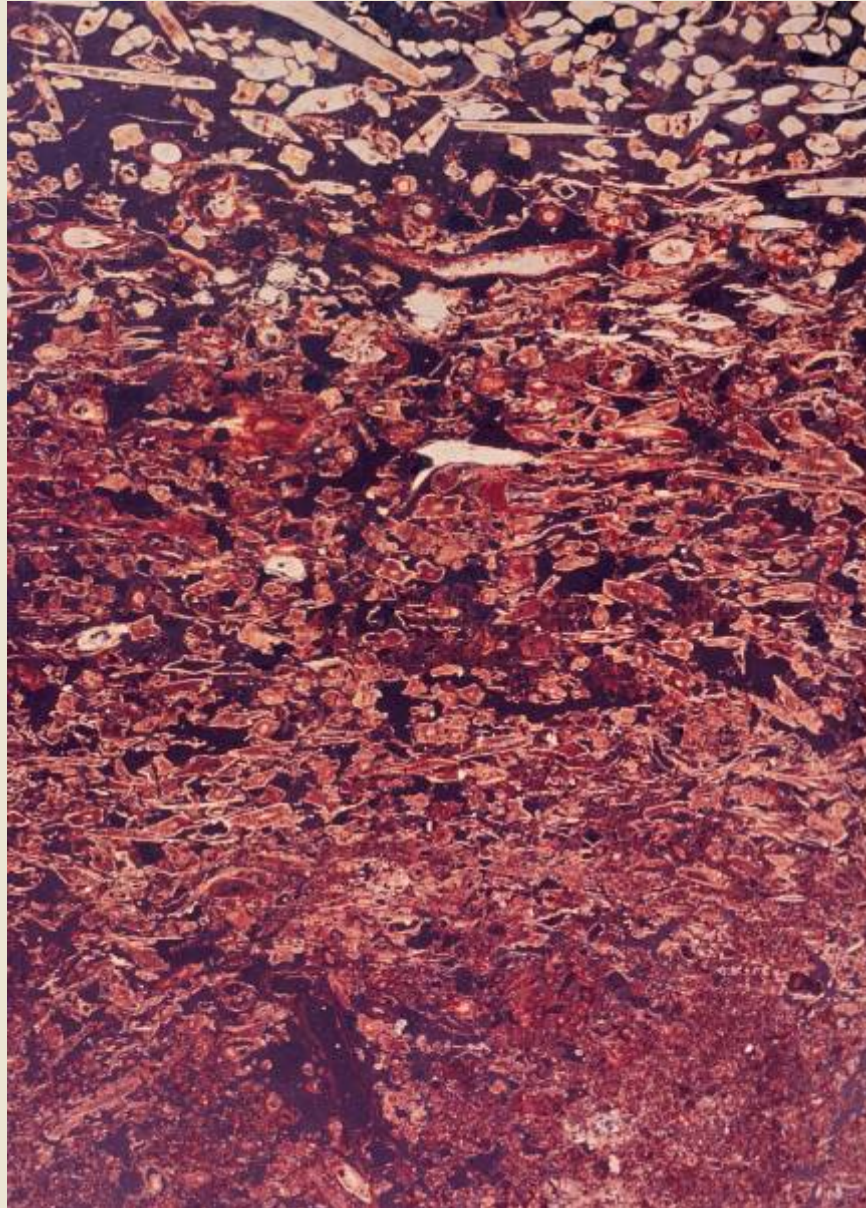
*KAK: Kationenaustauschkapazität

Die Huminstoffe des Bodens werden konventionell nach ihrem Lösungsverhalten gegenüber Laugen und Säuren in Fulvosäuren, Huminstoffe und Humine unterteilt. Die nur wenig gefärbten **Fulvosäuren** sind überwiegend gelöst (DOM: dissolved organic matter). Sie haben eine sehr hohe Kationenaustauschkapazität, wirken deutlich versauernd und sind starke Komplexbildner mit Metallen. **Huminsäuren** stellen meist den größten Teil der festen Huminstoffe (SOM: solid o.m.). Die kräftig gefärbten Makromoleküle sind schwache Säuren. Ihre Kationenaustauschkapazität ist zwar geringer als die der Fulvosäuren, übersteigt aber die KAK der Tonminerale beträchtlich. Der teilweise in den Kernen gebundene Stickstoff steht erst nach der Mineralisierung der Huminsäuren zur Verfügung. **Humine** sind oft sehr alte Huminstoffe, die mit Tonmineralen kaum zersetzbare „organomineralische Verbindungen“ bilden.

Was ist Humus?

Huminstoffbildung sichtbar gemacht: Rohhumus unter Nadelwald

ca. 8 cm



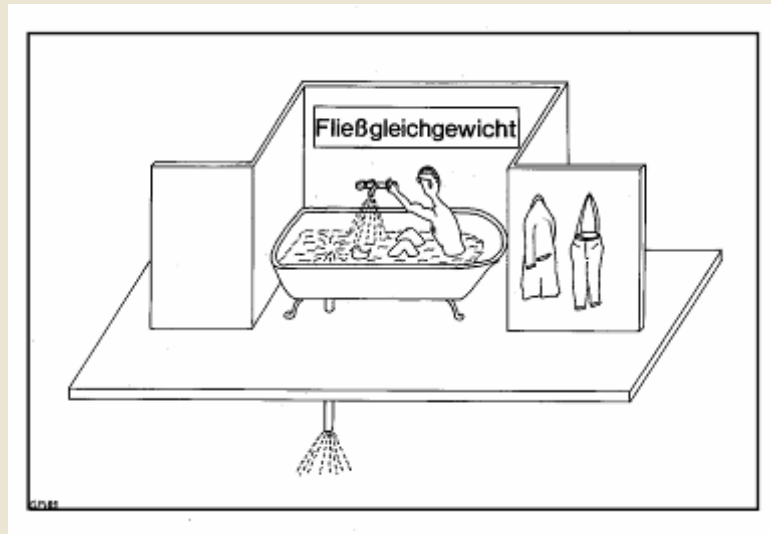
weitgehend unzersetzte
Nadelstreu (Cellulose leuchtet
hell)

weitgehend mechanisch
zerkleinerte und teilweise zu
Huminstoffen umgewandelte
Streulage (Cellulose ist nur
noch in frischen Wurzeln
sichtbar)

fast vollständig in Huminstoffe
umgewandelte organische
Substanz

Großdünnsschliff und Bild M.-W. v. Buch

Welche Faktoren beeinflussen den Humusgehalt eines Bodens?



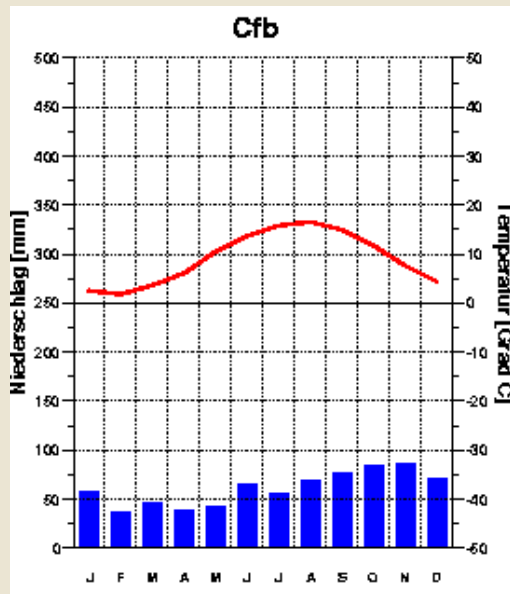
Der Humusgehalt eines Bodens stellt ein offenes Fließgleichgewicht aus Zufuhr (Streuuanfall) und Abfuhr (Mineralisierung) dar. Bei einer Änderung der Bilanzgrößen sinkt oder steigt der Gehalt im Boden bis ein neues Gleichgewicht erreicht ist. Die Spannweite der Gehalte an organischer Substanz in Böden reicht von humusfreien Sedimenten bis zu Torfen.

Der Gehalt an organischer Substanz wird von allen Faktoren bestimmt, die Einfluss entweder auf die Zufuhr oder auf die Abfuhr organischer Substanz nehmen:

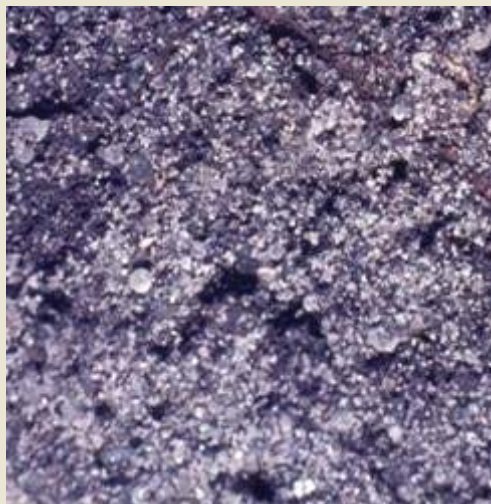
- Bodenklima (Temperatur/ Feuchte)
- Mineralzusammensetzung des Bodens
- Alter der Böden
- Art und Biomasse der Vegetation
- Bewirtschaftung (Pflügen, Zufuhr organischer Substanz, Düngung, Bodenerosion)

Die Faktoren sind teilweise wechselseitig korreliert.

Welche Faktoren beeinflussen den Humusgehalt eines Bodens?



www.klimadiagramme.de

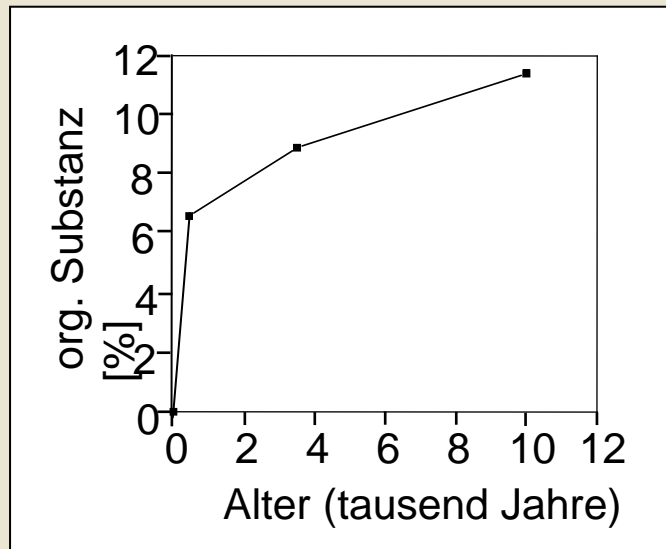


quarzreicher Sand

Bodenklima: Die Bodentemperatur steuert die Aktivität der Mikroorganismen und damit die Zersetzungsgeschwindigkeit der Streu. Sie ist bei winterlichen Temperaturen sehr gering (vgl. oben: Verlauf des Streuabbaus) und steigt, ausreichend Wasser vorausgesetzt, bis zu den höchsten Bodentemperaturen an. Mittlere Feuchtigkeitsverhältnisse begünstigen die Streuzersetzung. Bei Trockenheit bilden viele Organismen inaktive Dauerformen. In sehr feuchten oder nassen Böden ist die Zersetzung gehemmt, so dass sich Humus anreichert.

Mineralzusammensetzung des Bodens: Die Mineralzusammensetzung des Ausgangsgesteins beeinflusst die natürliche Fruchtbarkeit eines Bodens und damit Biomasse und Streufall. Ein quarzreicher Sand enthält nicht nur sehr viel weniger Pflanzennährelemente als ein Basalt, dessen Verwitterungsgeschwindigkeit und damit Nährstofffreisetzung außerdem wesentlich höher ist. Auch der Gehalt eines Bodens an Tonmineralen beeinflusst über die Bildung stabiler organomineralischer Komplexe den Humusgehalt.

Welche Faktoren beeinflussen den Humusgehalt eines Bodens?



Alter der Böden: Im Verlauf der Bodenentwicklung steigt der Gehalt an organischer Substanz zunächst schnell, später abnehmend bis er einen Höchstwert erreicht hat. Dies kann mehrere tausend Jahre dauern. Im Bild ist die altersabhängige Entwicklung des Humusgehalts eines Andosols dargestellt, der durch die Bildung organomineralischer Komplexe extrem hohe Humusgehalte erreicht.



Art und Biomasse der Vegetation: In Abhängigkeit von Klima und Bodeneigenschaften variiert die Produktivität der Vegetation und die Zusammensetzung der Streu in weiten Grenzen: Im tropischen Regenwald beträgt die Nettoprimärproduktion ca. 30, im mitteleuropäischen Laubwald ca. 11,5 und im borealen Nadelwald ca. 7,5 t/ha a⁻¹. Die Zersetzbarkeit der Streu von Coniferen und Zwergsträuchern ist so gering, dass sich Rohhumus bildet.

Welche Faktoren beeinflussen den Humusgehalt eines Bodens?



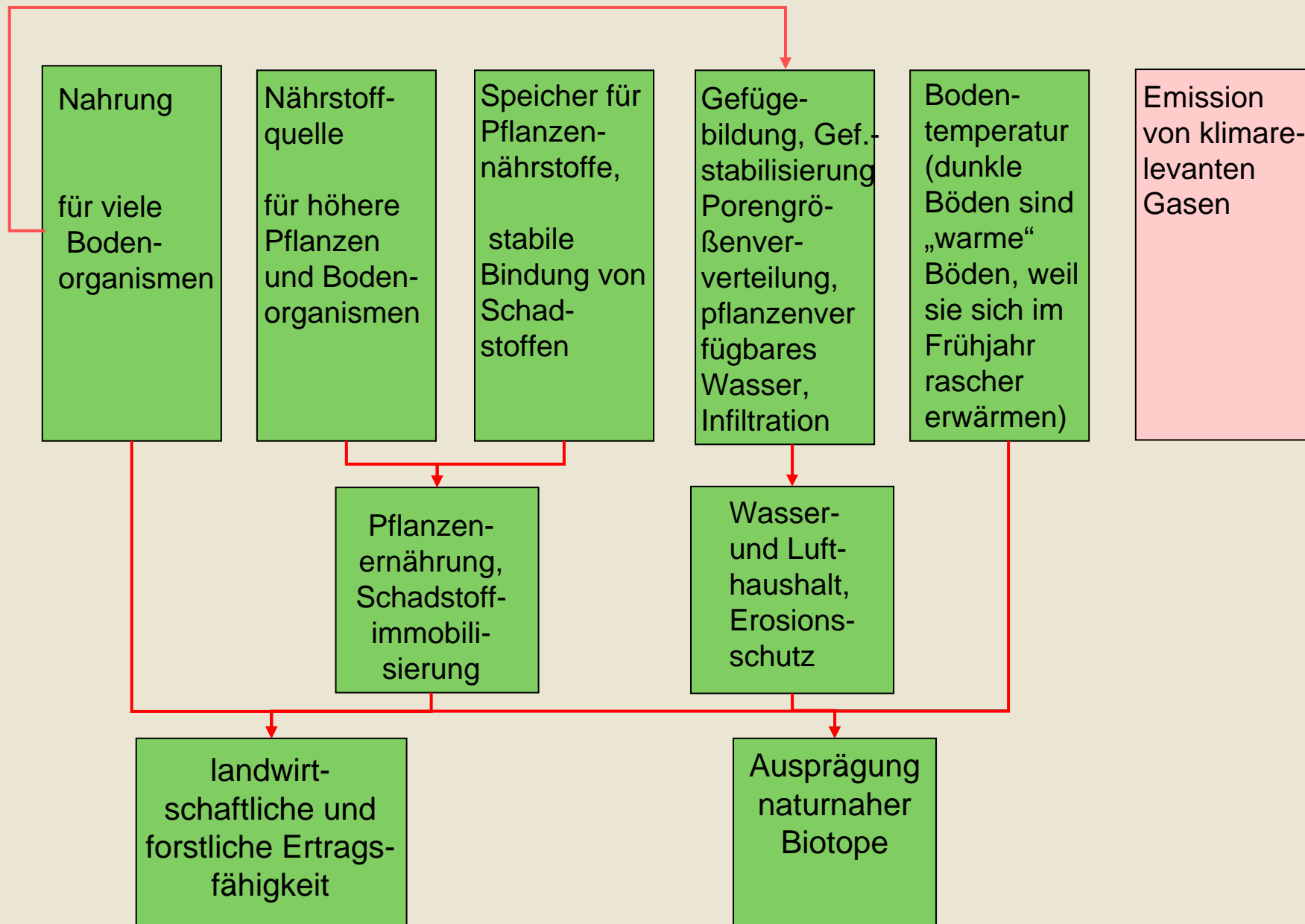
Pieter Bruegel d.Ä.: Der Sturz des Ikarus

Bodenbewirtschaftung: Durch Pflügen wird die Streuzersetzung angeregt, weil die Streu eingemischt wird, die Böden besser belüftet und physikalisch geschützte Humuspartikel freigelegt werden. Deshalb ist, unter sonst vergleichbaren Bedingungen, unter Wald mehr Humus angereichert, als unter Acker. Konservierende Bodenbearbeitung erhöht den Humusgehalt. Grünlandumbruch bewirkt eine erhebliche Verminderung des Humusgehalts.

Durch die Ernte wird organische Substanz dem Kreislauf entzogen, wobei der Entzug stark von der Art der Feldfrüchte abhängig ist. Die Zufuhr von organischem Material in Form von Gründüngung, Wirtschaftsdüngern, Klärschlämmen, Kompost oder Gründüngung erhöht den Humusgehalt. Die Humusreproduktion nimmt in der angegebenen Reihenfolge zu.

Durch unsachgemäße Bewirtschaftung kann die Bodenerosion durch Wasser und Wind gefördert werden. Man beachte, dass Konturpflügen schon vor 450 Jahren in Mode war!

Welche Wirkung hat Humus auf das Ökosystem?



Literatur:

Babel, U.: Micromorphology of Soil Organic Matters, In: J.E. Gieseking (Hrsg.): Soil Components Vol. 1, 1975.

Buch, M.-W. v.: unveröffentlichtes Bild.

Eisenbeis, G. u. W. Wichard: Atlas zur Biologie der Bodenarthropoden, 1985.
Fischer, Stuttgart.

Gisi, U. (1997): Bodenökologie. Thieme, Stuttgart, New York.

Graff, O. (1953): Die Regenwürmer Deutschlands. Schaper, Hannover.

Scheffer/Schachtschabel (2002): Lehrbuch der Bodenkunde, Spektrum,
Heidelberg, Berlin.

Ziechmann, W. (1980): Huminstoffe, Verlag Chemie. Weinheim, Deerfield Beach,
Florida, Basel.