

Aus der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau München
und dem Institut für Pflanzenernährung der Technischen Universität München-
Weihenstephan

Über die Humusbildung bei der Verrottung von Maisstroh

Von A. Wagner, A. Amberger, F. Rassadi

Zusammenfassung

In einem Modellversuch wurde Maisstroh nach Blättern, Stengeln und Spindeln getrennt und nach Zusatz von 0, 0,5, 1 und 1,5% Stickstoff in Form von Harnstoff bzw. Kalkstickstoff zur Verrottung gebracht.

Die Rotte der Blätter verlief sehr rasch; nach 25 Wochen waren aus 300 g organischer Ausgangssubstanz 31—38 g Huminstoffe und 13—24 g Huminsäuren (ohne bzw. mit N-Zugabe) gebildet worden. Der N-Gehalt der Huminstoffe betrug 3,1—4,5%.

In der gleichen Zeit entstanden aus dem *Stengelmaterial* 8 g Huminstoffe, keine Huminsäuren; durch N-Zusatz stiegen diese Werte auf 16 bzw. 18 g an. Zudem enthielten diese Huminstoffe mehr Stickstoff (3,8—4,6%). Das Lignin der Stengel ging leicht in Lösung und bildete große Mengen an Huminsäurevorstufen (Ligninsäuren, Humoligninsäuren), die nur nach höherem N-Zusatz stärker zu Huminsäuren bzw. Huminstoffen kondensierten.

Die stickstoffärmeren und teilweise verholzten *Spindeln* waren nach 25 Wochen kaum zur Hälfte zersetzt. Es entstanden 17—30 g Huminstoffe, aber nur 1—4 g Huminsäuren. Der N-Gehalt der Huminstoffe betrug 2,1—3,8%. Wahrscheinlich wurde das schwerlösliche Lignin der Spindeln unmittelbar mit N-Stoffwechselprodukten in unlösliche Huminstoffe übergeführt.

Eingang des Manuskripts: 29. 3. 74

Das nach der Körnermaisernte anfallende Stroh kann zum einen als Humuslieferant für den Boden sinnvoll genutzt werden; zum anderen enthält es relativ hohe Mengen an Mineralstoffen (= Pflanzennährstoffen). Wegen der großen Bedeutung des Humus für Bodenfruchtbarkeit und Bodengesundheit ist es erforderlich, seine Bildung zu fördern. Ammoniak ist in der Lage, mit Rotteprodukten unter Bildung von Huminstoffen zu reagieren. Im Gegensatz dazu wird Nitrat im Boden kaum sorbiert, sondern entweder von den Pflanzen aufgenommen oder ausgewaschen bzw. denitrifiziert. Ständiger Auf- und Abbau von Humus verbessert die physikalischen Eigenschaften eines Bodens und stellt darüber hinaus eine langsam fließende N-Quelle für die Pflanzen dar.

In den folgenden Modellversuchen wurden deshalb Ammoniak liefernde N-

Dünger wie Harnstoff und Kalkstickstoff dem verrottenden Maisstroh zugesetzt. Die Verrottung pflanzlichen Materials ist stets von einer Dunkel-färbung begleitet, die sowohl für die mehr oder minder starke Veränderung vorhandener Stoffgruppen wie auch für die Entstehung völlig neuer organischer Stoffe charakteristisch ist. Humusstoffe sind ein schwer zu definierendes, heterogenes Gemisch, das nur in Fraktionen entsprechend der analytischen Verfahrensweise aufgeteilt werden kann. Um die im jeweiligen Rottestadium auftretenden Humusstoffe erfassen und miteinander vergleichen zu können, benutzen wir die nachstehend erwähnten Methoden. Wir sind der Auffassung, daß auf diese Weise das Ausmaß der Humusbildung parallel zur Zersetzung des Ausgangsmaterials hinreichend gekennzeichnet ist.

Versuchsdurchführung

In vorangegangenen Arbeiten (1, 2, 3) über den Abbau organischer Stoffgruppen sowie über das Verhalten des Stickstoffes bei der Verrottung von Maisstroh sind die Versuchsbedingungen bereits eingehend beschrieben. Maisstroh wurde in Blättern, Stengeln und Spindeln getrennt, 0, 0,5, 1 oder 1,5% Stickstoff (bezogen auf die organische Substanz des Pflanzenmaterials) in Form von Harnstoff (H1, H2, H3) bzw. Kalkstickstoff (K1, K2, K3) zugesetzt und anschließend zur Verrottung gebracht. Die Probenahme für die entsprechenden Untersuchungen erfolgte zunächst wöchentlich (5 Wochen), anschließend im Abstand von 5 Wochen (bis zu 40 Wochen).

Methodik

Der Humifizierungsgrad wurde durch folgende Untersuchungen gekennzeichnet:

1. Der Farbwert (FW) analog der Humifizierungszahl (HZ) nach Springer gibt die Extinktion an, die der dunkel gefärbte Laugeextrakt von 1 g organischer Substanz nach Säurebehandlung (SrL) besitzt (1 cm Schichtdicke, 100 ml Extrakt, Filter 57 ELKO). Der Farbwert ist 3,8mal kleiner als die Humifizierungszahl (8).
2. Die Huminsäuren (Hs) wurden durch Extraktion mit Lauge und anschließender Reinigung der Präparate durch Fällen, Zentrifugieren, Filtrieren und Extrahieren mit Benzol-Alkoholgemisch (1:1) gewonnen.
3. Die Bestimmung der Huminstoffe erfolgte mittels Sulfacetolyse nach Springer (8).
4. Das Lignin bzw. der Lignin-Humuskomplex wurde durch Extraktion mit 80%iger Schwefelsäure erfaßt (4).

Ergebnisse

1. Farbwerte (Tab. 1)

Der Farbwert (FW), ein Maß für die Menge an laugelöslichen Humusstoffen, läßt den Beginn der Humifizierung erkennen, noch bevor beständige Humusfraktionen nachweisbar sind. Er ist bei Beginn der Rotte in den Blättern schon ziemlich hoch (0,46), da in Anbetracht der späten Ernte des Körnermaises sicherlich bereits ein gewisser natürlicher Abbau der Inhaltsstoffe in den Pflanzen begonnen hat. Auch in den Stengeln, mehr noch aber in den Spindeln gehen mit Lauge gelblich bzw. rötlich gefärbte organische Stoffe in Lösung, die wahrscheinlich oxydativ verändertes Lignin sowie Derivate des Carotins, Xantophylls u. a. darstellen.

Die Farbwerte steigen in allen Versuchsgruppen bereits nach 5wöchiger Rotte deutlich an. Mit dem Abbau des organischen Materials erfolgt bis zur 40. Woche ein Anstieg der Farbwerte. Im Rottematerial der Blätter erhöht sich der Farbwert bis zur 5. Woche in

allen Versuchsgruppen praktisch gleich stark, mit Ausnahme der 0-Gruppe. Nach 25 Wochen haben sich die Werte in allen Gruppen weitgehend angeglichen und liegen dann auf nahezu gleicher Höhe. Farbwerte von 3,9 entsprechen etwa denjenigen, die wir in früheren Arbeiten in gut verrotteten Misten, Komposten usw. erhalten haben (4). In den Stengeln verläuft die Entwicklung der Farbwerte ähnlich wie in den Blättern, jedoch mit dem Unterschied, daß sie im Durchschnitt kaum halb so hoch sind. Da sich die Farbwerte der verschiedenen Versuchsgruppen erst später (nach 40 Wochen) angleichen, kann von einer deutlich langsameren Rotte der Stengel gesprochen werden. Die Farbwerte der Spindeln weisen im Rotteverlauf eine ähnliche Tendenz wie die Stengel auf; sie liegen ebenfalls nur etwa halb so hoch wie die der Blätter. Selbst nach 40 Wochen sind die Unterschiede zwischen den Versuchsgruppen wegen einer sehr langsamen und unregelmäßigen Zersetzung recht groß. Insgesamt betrachtet unterscheiden sich die Farbwerte zwischen Blättern, Sten-

Tabelle 1: Farbwerte, Huminsäuren und Huminstoffe im Verlauf der Rotte von Maisstroh (Ausgangsmenge: 300 g organische Substanz/Gefäß)

Rottezeit (Wochen)	0			H 1			H 3			K 1			K 3		
	FW	Hs	HSt	FW	Hs	HSt	FW	Hs	HSt	FW	Hs	HSt	FW	Hs	HSt
<i>Blätter</i>															
0	0,46	—	9,0	0,46	—	9,0	0,46	—	9,0	0,46	—	9,0	0,46	—	9,0
5	1,05	0,19	8,3	1,53	11,9	18,6	1,53	0,4	19,7	1,50	5,4	16,9	1,54	16,1	21,5
10	1,51	0,45	11,5	2,42	12,7	26,0	2,00	7,0	25,0	1,85	5,8	24,0	1,92	22,2	30,6
15	2,64	12,5	26,3	3,08	12,4	34,0	2,63	11,1	32,0	2,90	10,9	34,7	2,05	22,4	32,5
20	3,06	13,2	30,3	3,20	11,7	36,6	2,78	10,8	34,4	3,12	10,7	38,4	2,53	22,2	31,1
25	3,21	13,1	30,8	3,28	13,0	36,7	3,17	12,0	37,1	3,35	10,8	38,0	3,14	23,6	34,4
40	3,9	15,0	35,0	3,5	16,0	40,0	3,8	16,0	39,0	3,8	16,0	39,0	3,9	27,0	40,0
<i>Stengel</i>															
0	0,12	—	3,3	0,12	—	3,3	0,12	—	3,3	0,12	—	3,3	0,12	—	3,3
5	0,79	0	5,3	0,61	0,4	8,3	0,55	0,2	4,7	0,50	3,2	3,7	0,52	5,8	4,7
10	1,29	0	4,6	1,19	0,4	9,0	0,79	0,3	11,9	0,90	2,9	5,7	0,92	15,6	9,5
15	1,60	0	5,4	1,41	3,8	12,7	1,25	13,0	12,8	1,23	3,4	9,7	1,23	17,6	11,4
20	1,82	0	7,0	1,53	8,0	13,0	1,55	12,8	12,8	1,58	12,5	12,0	1,27	17,2	11,9
25	1,94	0,3	8,3	1,84	12,5	15,8	1,55	15,7	12,4	1,69	17,6	15,9	1,68	17,1	13,2
40	1,8	1,2	11,0	1,9	11,4	13,0	1,8	12,0	13,0	1,7	14,0	18,0	1,9	19,0	18,0
<i>Spindeln</i>															
0	0,33	—	17,4	0,33	—	17,4	0,33	—	17,4	0,33	—	17,4	0,33	—	17,4
5	0,53	2,3	14,6	0,44	1,2	17,0	0,44	2,2	29,3	0,45	1,5	25,6	0,55	2,8	35,7
10	0,63	2,3	13,5	0,60	1,9	16,0	0,50	1,4	28,1	0,63	1,8	22,1	0,66	2,5	39,7
15	0,72	1,4	12,1	0,84	1,4	16,0	0,58	1,5	25,0	0,92	1,8	25,0	0,75	2,3	36,5
20	0,82	1,5	13,5	0,99	1,4	20,4	0,69	1,8	26,5	1,04	1,3	26,4	0,92	2,9	32,1
25	0,89	1,7	16,5	1,20	1,9	22,2	0,74	1,7	27,0	1,15	0,8	25,4	1,16	3,7	30,0
40	1,40	1,8	18,0	1,40	1,7	21,0	0,90	1,7	26,0	1,40	1,2	29,0	1,80	4,1	37,0

FW = Farbwerte (1 g org. Subst./100 ml Extrakt)
 Hs = Huminsäuren in g/Gefäß
 HSt = Huminstoffe in g/Gefäß

0 = Kontrolle (ohne N-Zugabe)
 H = Harnstoffzugabe
 K = Kalkstickstoffzugabe

geln und Spindeln erheblicher als zwischen den Versuchsgruppen (N-Düngung). Damit kann gesagt werden, daß Struktur und Zusammensetzung des Ausgangsmaterials einen stärkeren Einfluß als Form bzw. Menge des zugesetzten Stickstoffs auf die Zersetzung und Humifizierung von Maisstroh haben.

2. Huminsäuren (Tab. 1)

Huminsäuren treten im Boden sowohl als Zwischenprodukt der Humusbildung aus frischer organischer Substanz als auch beim Abbau von Humus auf. Sie stellen daher ein Maß für den Umsatz an Huminstoffen dar. Im Vergleich zum „Farbwert“ kann in den „Huminsäu-

ren“ eine wesentlich beständigere Humusfraktion gesehen werden.

In den *Blättern* der 0- bzw. H3-Gruppe sind merkliche Mengen an Huminsäuren erst um die 15. bzw. 10. Woche nachzuweisen, während in den übrigen Gruppen größere Anteile bereits nach 5 Wochen vorhanden sind. Die Ursache der Verzögerung dürfte in der 0-Gruppe in einem gewissen N-Mangel, in der H3-Gruppe in dem hohen NH₃-Angebot und der damit verbundenen pH-Änderung (pH 9—10) liegen. Die hohen Hs-Werte in H1 und K3 (in geringerem Umfang auch K1) sind dagegen auf ein günstiges NH₃-Angebot aus der Harnstoffzersetzung bzw. auf das zu Kondensations- und Polymerisationsreaktionen neigende Cyanamid zurückzuführen. In

den *Stengeln* verläuft die Rotte wesentlich langsamer als in den Blättern, so sind in den Gruppen H1, H3 und K1 erst nach 15—20 Wochen, in der 0-Gruppe erst nach 40 Wochen größere Mengen an Huminsäuren festzustellen. In der K3-Gruppe jedoch setzt die Huminsäurebildung schon nach wenigen Wochen der Rotte ein. Nach 40 Wochen ist der Gehalt an Huminsäuren in den einzelnen Versuchsgruppen sehr unterschiedlich, im Gegensatz zu den ausgeglichenen Farbwerten. Zu diesem Zeitpunkt ist der Huminsäuregehalt im Stengelmaterial etwa $\frac{3}{4}$ so hoch wie im Blattmaterial. Gegenüber der 0-Gruppe bewirkt die N-Zufuhr eine raschere Zersetzung und Humifizierung des Ausgangsmaterials. Der Huminsäureanteil in den verrottenden Spindeln ist sehr gering. Selbst nach 40 Wochen sind bei gleichzeitig niedrigem Farbwert nur wenige Gramm Huminsäuren festzustellen. Die höchsten Werte finden sich, ähnlich wie in den Blättern und Stengeln, in der K3-Gruppe. Die Hauptursache für die schwere Zersetzbarkeit der Spindeln liegt in ihrer starken Verholzung und dem geringen Gehalt an Stickstoff.

Zwischen Farbwert und Huminsäuremenge besteht kein Zusammenhang. So sind z. B. in der K3-Gruppe der Blätter die Farbwerte trotz sehr viel stärkerer Huminsäurebildung nicht höher als in allen anderen Gruppen. Ebenso stehen in der Kontrollgruppe den Farbwerten keine meßbaren Mengen an Huminsäuren gegenüber. Der Grund hierfür liegt darin, daß der Farbwert nicht mit den Huminsäuremengen identisch ist, sondern daß in ihm auch Huminsäurevorstufen wie Lignin- und Humoligninsäuren, Fulvo- und Hymatomelansäuren o. ä. enthalten sind (6). Solche Verbindungen sind noch nicht so weit kondensiert oder polymerisiert, daß sie mit Säure fällbar wären, können aber trotzdem schon dunkel gefärbt sein. Im Rottematerial der Stengel sind sie in großen Mengen vorhanden, während sie

vor allem in den Spindeln fast gänzlich fehlen.

3. Huminstoffe (Tab. 1)

Die Huminstoffe (HSt) umfassen hauptsächlich die in Lauge und Säure unlöslichen, schwer hydrolysierbaren und höher molekularen Verbindungen, also den chemisch wie biologisch sehr resistenten Huminkomplex. Letzterer enthält auch die hoch entwickelten und sehr beständigen Huminsäuren, wie sie fast durchwegs nur in Böden vorkommen. Weniger stabile Huminsäuren, vor allem solche in Torfen, Komposten und anderen Rotteprodukten, werden im Sulfacetolysegemisch leicht peptisiert und können durch Verdünnen des Filtrates größtenteils wieder ausgefällt werden.

Wird frisches Pflanzenmaterial sulfacetolysiert, so verbleibt meist ein Rückstand, der durch Kondensation von Lignin, Eiweiß und Kohlenhydraten (künstliche Humifizierung) entstanden ist. Er beträgt in den Blättern 3, in den Stengeln 1,1 und in den Spindeln 5,8% der Trockensubstanz. In letzteren scheint ein gewisser Teil des Lignins so stark polymerisiert bzw. verholzt zu sein, daß er in dem verwendeten Reagens unlöslich bleibt.

Im Rotteverlauf bilden sich Huminstoffe früher und in größerer Menge als Huminsäuren. In den Blättern, deren Zersetzung zu Versuchsende am weitesten fortgeschritten ist, sind die meisten Huminstoffe gebildet. Nach 25, besonders aber nach 40 Wochen ist, unabhängig von der Form und Menge des zugegebenen Stickstoffs, in allen Gruppen die gleiche Menge vorhanden. In den *Stengeln* werden durchschnittlich kaum halb soviel Huminstoffe gebildet wie in den Blättern. Nach 40 Wochen bestehen teilweise noch große Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen: in der 0-Gruppe ist die geringste, in den K-Gruppen die größte Menge trotz gleich starker Zersetzung in den

H- und K-Gruppen vorhanden. In den stickstoffarmen Stengeln wurde also sowohl die Huminstoff- wie auch die Huminsäurebildung durch Kalkstickstoff wesentlich mehr begünstigt als in den Blättern. In den Spindeln bleibt nach der Sulfacetolyse des Ausgangsmaterials ein Rückstand von 5,8% bzw. 17 g/Gefäß. Dieser unlösliche, sehr schwer zersetzbare Anteil geht während der Verrottung in der 0-Gruppe bis zur 15. Woche zurück, d. h. diese chemisch bzw. biologisch sehr widerstandsfähige Substanz wird nur langsam angegriffen. In der H1-Gruppe entspricht der Abbau ungefähr der Zunahme an neugebildeten Huminstoffen, in den übrigen N-Gruppen ist die Neubildung von Huminstoffen stärker als die Zersetzung des resistenten, unlöslichen Rückstandes. Der allmähliche Abbau zeigt sich auch hier in einem anfänglichen Rückgang und späteren Anstieg der Huminstoffwerte. Nach 40 Wochen Rotte sind die Spindeln trotz starker Huminstoffbildung immer noch relativ wenig zersetzt. Letztere beträgt zwischen 18 (0-Gruppe) und 37 g/Gefäß (K3). Da die NH_3 -Verluste in den H-Gruppen zu Beginn der Rotte sehr groß sind (langsamer Abbau und N-Einbau, geringes Wasseraufnahmevermögen), bleiben Zersetzung und Huminstoffbildung gegenüber den Kalkstickstoffgruppen stark zurück. Die langsam und über eine längere Zeitspanne hinweg erfolgende NH_3 -Entwicklung aus dem Cyanamid ist der Stickstoffverwertung durch die Mikroorganismen und dem schwierigen Abbau des Materials besser angepaßt als die plötzlich auftretende NH_3 -Freisetzung aus dem Harnstoff. Trotz äußerst geringer Huminsäurebildung sind dadurch in den Spindeln — zumindest in der K3-Gruppe — beinahe ebenso viele Huminstoffe entstanden wie in den schon sehr viel weiter verrotteten Blättern. Die Huminstoffbildung verläuft somit in den Blättern, Stengeln und Spindeln unter gleichen Bedingungen sehr verschieden. Sie

hängt von der Struktur (mehr oder weniger starke Verholzung) und vom N-Gehalt bzw. C/N-Verhältnis des Ausgangsmaterials sowie der zugesetzten N-Form ab.

4. Stoffabbau und Huminstoffbildung

Tab. 2 zeigt eine Gegenüberstellung des Stoffabbaues (Zellulose, Pentosanen, Lignin) und der Humusbildung nach 25 Wochen Rotte.

Der Gehalt an Zellulose und Pentosanen ist in den *Blättern* bereits so weit zurückgegangen, daß er ungefähr dem eines Mineralbodens entspricht. Die in 80%iger Schwefelsäure unlösliche organische Substanz, praktisch dem Lignin entsprechend, vermindert sich nur wenig (von 42 auf etwa 35 g) und ist im Sulfacetolysegemisch weitgehend unlöslich geworden, d. h. in Huminstoffe übergegangen. Der hohe N-Gehalt dieser Huminstoffe deutet darauf hin, daß zugesetzter Stickstoff bzw. stickstoffhaltige Stoffwechselprodukte an ihrer Entstehung stark beteiligt waren. Eine grobe Rechnung ergibt, daß höchstens ein Anteil von 20—25% der Huminstoffe aus Eiweiß entstanden sein können. In Wirklichkeit dürfte dieser Anteil sehr viel geringer sein, da Lignin auch unmittelbar mit Ammoniak reagieren kann. Jedenfalls muß der weitaus größte Teil des Lignins mit in die Huminstoffe bzw. Huminsäuren eingebaut worden sein. Vermutlich erfolgt die Huminstoffbildung aus Lignin nicht nur aus dessen einfachen Bausteinen (über Polyphenole und Chinone mit weiterer Kondensation), die erst zu Huminsäuren führt, sondern auch aus größeren Molekülverbänden des Lignins, welche das frühzeitige Entstehen von unlöslichen, meist noch ligninhaltigen Huminstoffen erklären könnten.

In den weit weniger verrotteten *Stengeln* nimmt der H_2SO_4 -unlösliche Rückstand während 25 Wochen Rottezeit viel stärker ab (von 56 auf etwa 35 g) bei einer relativ geringen Huminstoff-

Tabelle 2: Zellulose, Pentosane, „Lignin-Humuskomplex“, Huminstoffe und Huminsäuren nach 25 Wochen Rotte (g/Gefäß)

	Ausgangswert	Versuchsgruppen				
		0	H 1	H 3	K 1	K 3
<i>Blätter</i>						
Zellulose	94	6	7	8	8	13
Pentosane	93	10	10	12	10	12
„Lignin-Humuskomplex“	42	36	35	35	35	41
Huminstoffe	(9)	31	37	37	38	34
Huminsäuren	—	13	13	12	11	24
% N i. HSt	—	3,10	3,55	3,40	3,62	4,50
<i>Stengel</i>						
Zellulose	93	56	25	21	24	23
Pentosane	75	38	20	17	18	16
„Lignin-Humuskomplex“	56	41	37	34	35	34
Huminstoffe	(3)	8	16	12	16	13
Huminsäuren	—	0	13	16	18	17
% N i. HSt	—	3,77	3,97	4,28	4,08	4,60
<i>Spindeln</i>						
Zellulose	107	72	42	64	52	55
Pentosane	107	71	46	63	46	39
„Lignin-Humuskomplex“	57	45	43	45	48	48
Huminstoffe	(17)	17	22	27	25	30
Huminsäuren	—	2	2	2	1	4
% N i. HSt	—	2,12	3,31	2,68	3,82	3,19

stoffbildung. Der Stickstoffgehalt der Huminstoffe aus Stengeln ist höher als der der Blätter; das bedeutet eine stärkere Beteiligung von Stoffwechselprodukten an ihrer Entstehung. Dagegen wird durch die Sulfacetolyse ein erheblicher Teil des Lignins, soweit es noch in ursprünglicher oder wenig veränderter Form vorliegt, aus dem Lignin-Huminkomplex gelöst, insbesondere in der noch gering verrotteten 0-Gruppe. Das Lignin der Stengel erscheint leicht löslich und sehr reaktionsfähig, wie aus der Bildung großer Mengen sehr dunkel gefärbter, nicht säureabfällbarer Huminsäurevorstufen (Ligninsäuren, Humoligninsäuren [5, 6]) hervorgeht. Dieses entmethylierte und oxydierte lösliche Lignin verbindet sich mit Eiweiß bzw. Aminosäuren des mikrobiellen Stoffwechsels unter Bildung chemisch zwar leicht hydrolysierbarer, biologisch aber schwer angreifbarer Lignin-Proteinkomplexe, wie sie besonders im Rinderkot und Stallmist anzutreffen

sind (7). In der 0-Gruppe der Stengel wird auf diese Weise von dem nur in geringer Menge vorhandenen Stickstoff ein erheblicher Teil längere Zeit blockiert und damit der mikrobielle Abbau sowie die Weiterentwicklung der Huminsäurevorstufen stark verzögert. In den N-Gruppen erfolgt dagegen je nach der Menge des verabreichten Stickstoffs der Übergang der Lignin- und Humoligninsäuren in Lignohumin- und Huminsäuren, d. h. die Kondensation und Polymerisation zusammen mit stickstoffhaltigen Stoffwechselprodukten erfolgt sehr viel früher und stärker als in der 0-Gruppe.

Die stickstoffarmen *Spindeln* werden langsamer zersetzt als die Stengel; sie enthalten nach 25 Wochen immer noch 40—70% der Anfangsmenge an Zellulose und 39—71% an Pentosanen. Der H_2SO_4 -unlösliche Rückstand („Lignin-Humuskomplex“) verändert sich in den Spindeln weniger als in den Stengeln (Rückgang um 20 bzw. 35%). Die

Bildung an Huminstoffen dagegen ist in den Spindeln nahezu doppelt so hoch. Ein größerer Teil des Lignins ist daher löslich geworden und in die Huminsäuren bzw. deren Vorstufen eingebaut worden. Das Lignin der Spindeln dagegen ist durch die Rotte weit weniger löslich geworden (sehr geringe Bildung von Huminsäuren bzw. Vorstufen) und zu einem höheren Anteil (im Vergleich zu den Stengeln) in Huminstoffe umge-

wandelt worden. Der niedrigere N-Gehalt dieser Huminstoffe weist ebenfalls auf eine stärkere Beteiligung des Lignins an der Huminstoffbildung hin. In dem H_2SO_4 -unlöslichen Lignin-Huminkomplex der Spindeln und Stengel ist praktisch noch die gleiche Menge sulfacetolyselöslichen Lignins vorhanden. Das Lignin der Spindeln ist vermutlich in einer höher polymeren, stark vernetzten und damit schwerer lösli-

x—x = Zellulose; •—• = Huminstoffe; ◦—◦ = Huminsäuren
Ausgangsmenge: 300g org. Subst./Gefäß

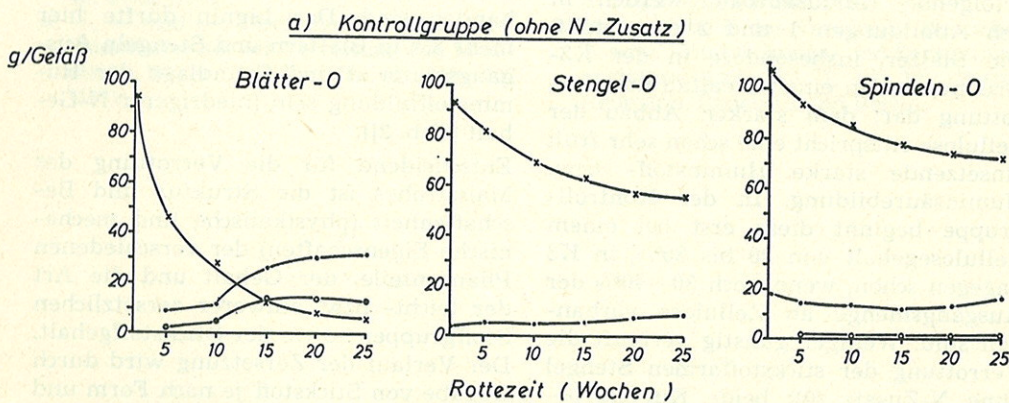


Abb. 1: Zelluloseabbau und Humusaufbau bei der Verrottung von Maisstroh ohne N-Zusatz

x—x = Zellulose; •—• = Huminstoffe; ◦—◦ = Huminsäuren
Ausgangsmenge: 300g org. Subst./Gefäß

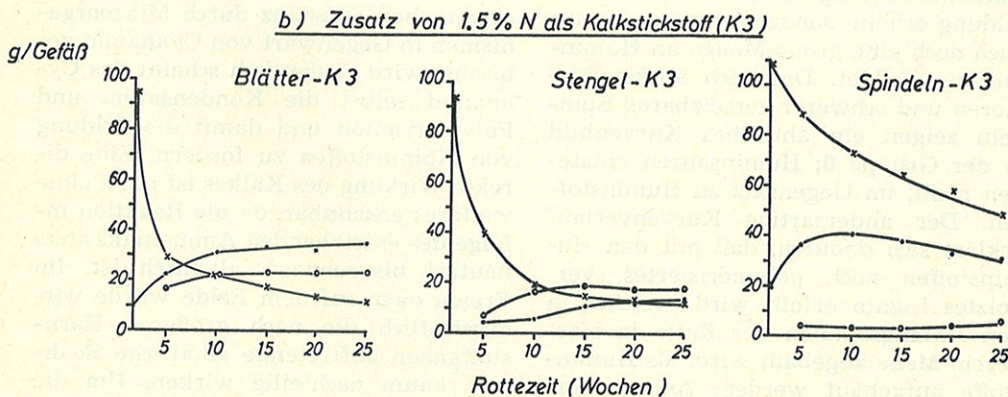


Abb. 2: Zelluloseabbau und Humusaufbau bei der Verrottung von Maisstroh mit N-Zusatz

chen Form vorhanden und wird sofort nach Freilegung mit Stickstoff- bzw. N-Stoffwechselprodukten in Huminstoffe übergeführt. In den Stengeln scheint Lignin in niedermolekularem, beweglichem Zustand vorzuliegen und nach dem Abbau der Kohlenhydrate sofort löslich und stark reaktionsfähig zu werden; Mangel an Stickstoff bzw. Eiweiß kann auf die weitere Zersetzung (Eiweißblockierung, Einschluß der Zellulose) hemmend wirken.

Die zwei wesentlichen Vorgänge der Verrottung, nämlich der Abbau der organischen Substanz und der gleichzeitig erfolgende Humusaufbau, werden in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die Blätter, insbesondere in der K3-Gruppe, stellen einen Idealfall der Verrottung dar; dem starken Abbau der Zellulose entspricht eine schon sehr früh einsetzende starke Huminstoff- bzw. Huminsäurebildung. In der Kontrollgruppe beginnt diese erst bei einem Zellulosegehalt von 20 bis 30%, in K3 dagegen schon, wenn noch 30—40% der Ausgangsmenge an Zellulose vorhanden sind. Weniger günstig verläuft die Verrottung der stickstoffarmen Stengel ohne N-Zusatz (0): beide Kurven berühren sich nicht. Die Zersetzung ist stark gehemmt, Huminstoffe entstehen nur in geringer Menge, Huminsäuren praktisch überhaupt nicht. Durch N-Zusatz (K3) wird nicht nur die Zersetzung stark beschleunigt und die Huminstoffbildung erhöht, sondern darüber hinaus auch noch eine große Menge an Huminsäuren gebildet. Die noch stickstoffärmeren und schwerer zersetzbaren Spindeln zeigen ein ähnliches Kurvenbild in der Gruppe 0; Huminsäuren entstehen nicht, im Gegensatz zu Huminstoffen. Der andersartige Kurvenverlauf erklärt sich dadurch, daß mit den Huminstoffen noch polymerisiertes, verholztes Lignin erfaßt wird, welches in den Anfangsstadien der Rotte in stärkerem Maße abgebaut wird, als Huminstoffe aufgebaut werden. Anders verhält sich die Huminstoffkurve in K3:

Durch N-Zusatz überwiegt anfangs der Aufbau von Huminstoffen gegenüber dem Abbau des schwer zersetzbaren Ligninanteils (Anstieg der Kurve), dann folgt ein stärkerer Abbau bzw. ein Inlösungsgehen des Lignins und nach dessen Umwandlung wiederum eine vermehrte Huminstoffbildung (Tab. 1). Huminsäuren sind selbst durch hohen N-Zusatz nur in sehr geringer Menge entstanden. Die Huminstoffbildung der Spindeln steigt bereits zu einem Zeitpunkt stark an (besonders in K3), zu dem noch 60—70% der Zellulose und Pentosane und folglich weniger stickstoffhaltige Stoffwechselprodukte vorhanden sind. Das Lignin dürfte hier mehr als in Blättern und Stengeln Ausgangsmaterial und Grundlage der Huminstoffbildung sein (niedrigerer N-Gehalt [Tab. 2]).

Entscheidend für die Verrottung des Maisstrohes ist die Struktur und Beschaffenheit (physikalische und mechanische Eigenschaften) der verschiedenen Pflanzenteile, der Gehalt und die Art der leicht- bzw. schwerer zersetzlichen Stoffgruppen sowie der Stickstoffgehalt. Der Verlauf der Zersetzung wird durch Zugabe von Stickstoff je nach Form und Menge wesentlich beschleunigt und die Bildung von mehr und stickstoffreicheren Huminstoffen gefördert. Der Huminstickstoff steigt mit höheren N-Gaben insbesondere in Form von Kalkstickstoff deutlich an, da der Abbau der organischen Substanz durch Mikroorganismen in Gegenwart von Cyanamid gebremst wird. Außerdem scheint das Cyanamid selbst die Kondensation und Polymerisation und damit die Bildung von Huminstoffen zu fördern. Eine direkte Wirkung des Kalkes ist nicht ohne weiteres erkennbar, da die Reaktion infolge des entstehenden Ammoniaks stets neutral bis schwach alkalisch ist. Im Freien oder auf dem Felde würde voraussichtlich die nach größeren Harnstoffgaben auftretende alkalische Reaktion kaum nachteilig wirken. Um die Zersetzung des Maisstrohes zu beschleunigen

nigen mit dem Ziel einer quantitativ und qualitativ erwünschten Humusbildung genügt für Blättermaterial eine Stickstoffgabe von 0,5%, für Stengel und Spindeln von etwa 1%.

Literaturverzeichnis

1. *Amberger, A.* und *Wagner, A.*: Stoffliche Veränderungen bei der Rotte von Maisstroh. Landw. Forsch. 19. Sonderheft, 3—11 (1965).
2. —, — und *Rassadi, F.*: Über den Abbau der organischen Substanz bei der Verrottung von Maisstroh. Bayer. Landw. Jb. 48, 3—22 (1971).
3. —, — und —: Über die Festlegung des Stickstoffes bei der Verrottung von Maisstroh. Bayer. Landw. Jb. 48, 190—205 (1971).
4. *Springer, U.*: Humifizierung und Zersetzung und ihre Bestimmung in Torfen, Stallmistern und anderen organischen Bildungen. Bodenkunde und Pflanzenernährung 18 (63), 129—167 (1940).
5. —: Neuere Methoden zur Untersuchung der organischen Substanz im Boden... Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde A 22, 135—152 (1931).
6. *Simon, K.*: Beiträge zur unterscheidenden Charakterisierung von Huminsäuren und alkalilöslichen Ligninen. Pflanzenernährung, Düngung und Bodenkunde A 27, 129—143 (1932).
7. *Wagner, A.*: Untersuchungen über die nach mehrjähriger organischer Düngung gebildeten Huminsäuren... Dissertation Stuttgart-Hohenheim 1958.
8. Methodenbuch des Verbandes Deutscher Landw. Untersuchungs- und Forschungsanstalten; 1955, Bd. I, 46. Jg.; Verlag Neumann, Radebeul und Berlin.

chen Form vorhanden und wird sofort nach Freilegung mit Stickstoff- bzw. N-Stoffwechselprodukten in Huminstoffe übergeführt. In den Stengeln scheint Lignin in niedermolekularem, beweglichem Zustand vorzuliegen und nach dem Abbau der Kohlenhydrate sofort löslich und stark reaktionsfähig zu werden; Mangel an Stickstoff bzw. Eiweiß kann auf die weitere Zersetzung (Eiweißblockierung, Einschluß der Zellulose) hemmend wirken.

Die zwei wesentlichen Vorgänge der Verrottung, nämlich der Abbau der organischen Substanz und der gleichzeitig erfolgende Humusaufbau, werden in den Abbildungen 1 und 2 dargestellt. Die Blätter, insbesondere in der K3-Gruppe, stellen einen Idealfall der Verrottung dar; dem starken Abbau der Zellulose entspricht eine schon sehr früh einsetzende starke Huminstoff- bzw. Huminsäurebildung. In der Kontrollgruppe beginnt diese erst bei einem Zellulosegehalt von 20 bis 30%, in K3 dagegen schon, wenn noch 30—40% der Ausgangsmenge an Zellulose vorhanden sind. Weniger günstig verläuft die Verrottung der stickstoffarmen Stengel ohne N-Zusatz (0): beide Kurven berühren sich nicht. Die Zersetzung ist stark gehemmt, Huminstoffe entstehen nur in geringer Menge, Huminsäuren praktisch überhaupt nicht. Durch N-Zusatz (K3) wird nicht nur die Zersetzung stark beschleunigt und die Huminstoffbildung erhöht, sondern darüber hinaus auch noch eine große Menge an Huminsäuren gebildet. Die noch stickstoffärmeren und schwerer zersetzbaren Spindeln zeigen ein ähnliches Kurvenbild in der Gruppe 0; Huminsäuren entstehen nicht, im Gegensatz zu Huminstoffen. Der andersartige Kurvenverlauf erklärt sich dadurch, daß mit den Huminstoffen noch polymerisiertes, verholztes Lignin erfaßt wird, welches in den Anfangsstadien der Rotte in stärkerem Maße abgebaut wird, als Huminstoffe aufgebaut werden. Anders verhält sich die Huminstoffkurve in K3:

Durch N-Zusatz überwiegt anfangs der Aufbau von Huminstoffen gegenüber dem Abbau des schwer zersetzbaren Ligninanteils (Anstieg der Kurve), dann folgt ein stärkerer Abbau bzw. ein Inlöslichgehen des Lignins und nach dessen Umwandlung wiederum eine vermehrte Huminstoffbildung (Tab. 1). Huminsäuren sind selbst durch hohen N-Zusatz nur in sehr geringer Menge entstanden. Die Huminstoffbildung der Spindeln steigt bereits zu einem Zeitpunkt stark an (besonders in K3), zu dem noch 60—70% der Zellulose und Pentosane und folglich weniger stickstoffhaltige Stoffwechselprodukte vorhanden sind. Das Lignin dürfte hier mehr als in Blättern und Stengeln Ausgangsmaterial und Grundlage der Huminstoffbildung sein (niedrigerer N-Gehalt [Tab. 2]).

Entscheidend für die Verrottung des Maisstrohes ist die Struktur und Beschaffenheit (physikalische und mechanische Eigenschaften) der verschiedenen Pflanzenteile, der Gehalt und die Art der leicht- bzw. schwerer zersetzlichen Stoffgruppen sowie der Stickstoffgehalt. Der Verlauf der Zersetzung wird durch Zugabe von Stickstoff je nach Form und Menge wesentlich beschleunigt und die Bildung von mehr und stickstoffreicheren Huminstoffen gefördert. Der Huminstickstoff steigt mit höheren N-Gaben insbesondere in Form von Kalkstickstoff deutlich an, da der Abbau der organischen Substanz durch Mikroorganismen in Gegenwart von Cyanamid gebremst wird. Außerdem scheint das Cyanamid selbst die Kondensation und Polymerisation und damit die Bildung von Huminstoffen zu fördern. Eine direkte Wirkung des Kalkes ist nicht ohne weiteres erkennbar, da die Reaktion infolge des entstehenden Ammoniaks stets neutral bis schwach alkalisch ist. Im Freien oder auf dem Felde würde voraussichtlich die nach größeren Harnstoffgaben auftretende alkalische Reaktion kaum nachteilig wirken. Um die Zersetzung des Maisstrohes zu beschleu-