

8

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

Über den Abbau der organischen Substanz bei der Verrottung von Maisstroh

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

Der Anbau von Körnermais ist in klimatisch geeigneten Gebieten in ständiger Zunahme begriffen, weil er hinreichend hohe Erträge liefert und ohne große Investitionen voll mechanisiert werden kann. Als Nachteil muß die sehr späte Ernte im Oktober/November betrachtet werden, bei der das grobe, feucht anfallende Maisstroh nicht wirtschaftlich getrocknet bzw. verwertet werden kann. Daher bietet sich die für Bodenfruchtbarkeit und Humusversorgung sehr wünschenswerte unmittelbare Verrottung des Strohs auf dem Felde bzw. im Boden an.

In den meisten bekannten Verrottungsversuchen standen die Huminstoffe, das Endprodukt der Verrottung, im Mittelpunkt der Überlegungen, ohne die Zersetzungsvorgänge im Verlaufe der Rotte zu verfolgen. Um den Ablauf und die Umstände kennenzulernen, unter denen diese Verrottung stattfindet bzw. gegebenenfalls beeinflußt werden kann, haben wir eine Reihe von Modellversuchen durchgeführt. In einer vorangegangenen Arbeit (1) wurde über die stofflichen Veränderungen bei der Rotte von Maisstroh berichtet. Diese Untersuchungen haben nunmehr einen gewissen Abschluß gefunden und sollen daher zusammenfassend behandelt werden.

Versuchsanstellung

Maisstroh wurde getrennt nach Blättern, Stengel und Spindeln auf 1—2 cm gehäckselt und in 5-l-Glasgefäßen (Einwaage jeweils 300 g organische Substanz) der Verrottung unterworfen. Innerhalb der drei Versuchsreihen (Blätter, Stengel, Spindeln) wurde der Stickstoffzusatz variiert: (0—0,5—1—1,5% N bezogen auf die organische Substanz) in Form von Harnstoff (H₁, H₂, H₃) bzw. Kalkstickstoff (K₁, K₂, K₃). Jede Versuchsgruppe wurde mit fünf Parallelen angesetzt und wöchentlich eine Probe entnommen (erster Versuch); der Gefäßinhalt wurde zwecks gleichmäßiger Durchfeuchtung alle 2—3 Tage gut durchgemischt. Im Anschluß daran folgte ein zweiter Versuch über 40 Wochen hinweg, bei dem die Probenahme alle fünf Wochen erfolgte und weniger oft gemischt wurde, um NH₃-Verluste zu verringern. Die Zersetzung verlief in letzterem Fall etwas langsamer.

Methodik

Im frischen Rottematerial wurde der pH-Wert (in Wasseraufschwemmung), in Blättern auch freies Ammoniak bestimmt. Alle übrigen Untersuchungen erfolgten im lufttrockenen Material; die Trocknung wurde bei etwa 50° C im Umluft-Trockenschrank während zwei Tagen durchgeführt.

Die organische Substanz (OS) wurde durch Glühverlust, der Kohlenstoffgehalt (C) nach SPRINGER-KLEE (2) ermittelt. Die direkt reduzierenden Zucker (DRZ) wurden in sehr kleinen Mengen nach der Mikromethode von HAGEDORN-JENSEN (4) mit Ferricyanid bestimmt, in zuckerreichem Material nach SCHOORL-LUFF (4) mit Kupfersulfat. Die Berechnung erfolgte als Glucose. Die nach Inversion reduzierenden Zucker wurden nach gleichen Methoden wie die DRZ bestimmt und mit diesen zusammen als Gesamtzucker (GZ) ausgewiesen. Die Berechnung erfolgte wiederum als Glucose. In den Tabellen ist die Differenz $GZ - DRZ =$ „Di- bzw. Oligosaccharide“ angegeben.

Zur Bestimmung der gesamthydrolysierbaren Kohlenhydrate (GHK) wurde die Substanz drei Stunden mit 2%iger HCl im kochenden Wasserbad hydrolysiert, der Zuckergehalt nach SCHOORL-LUFF (4) ermittelt und berechnet. Die Fraktion GHK schließt teils einfache Zucker (Mono- und Disaccharide), zum größten Teil aber solche ein, die erst durch Hydrolyse von Polysacchariden wie Stärke, Dextrinen, Pektinen sowie Uronsäuren, bereits veränderter Cellulose u. a. freigemacht werden. Bei Anwesenheit größerer Mengen Fructose (wie z. B. in Maisstengeln) kann jedoch unter Umständen ein erheblicher Teil davon neben einer geringen Menge anderer Zucker (6) zerstört werden. So können z. B. bei der Hydrolyse von Saccharose durch dreistündiges Erhitzen mit 2%iger HCl auf dem Wasserbad 25% des Zuckers, also praktisch die Hälfte der Fructose, zersetzt werden. Wegen des hohen Zuckergehaltes der Stengel wurde daher die Hydrolyse erst nach dem Herauslösen der Zucker mit Wasser durch kurzes Erwärmen (10 Min. auf dem Wasserbad) und Filtration vorsichtig vorgenommen. Auf diese Weise konnten hohe Fructoseverluste durch Säurehydrolyse vermieden werden; die Berechnung erfolgte wiederum als Glucose. In den Tabellen für Blätter und Spindeln ist die Differenz $GHK - GZ =$ hydrolysierbare Kohlenhydrate (HK) angegeben; in den Stengeln wurden die HK direkt bestimmt nach Entfernung der Zucker (5).

Die Bestimmung der Pentosane erfolgte durch Hydrolyse mit 12%iger HCl, Destillation und Fällung des übergegangenen Furfurols mit Phloroglucin (3). Wurde nach dreistündiger Hydrolyse mit 2%iger HCl (GHK-Bestimmung) der Rückstand auf Pentosane getestet, so konnten in den Blättern noch 12%, in den Stengeln 15% und in den Spindeln ebenfalls 12% der Gesamtmenge an Pentosanen gefunden werden; nach fünfständiger Hydrolyse mit 2%iger HCl unter Rückfluß (Bestimmung der Hemicellulosen nach der Stoffgruppenanalyse [6]) waren von den Pentosanen im Rückstand der Blätter noch 6%, der Stengel 8% und der Spindeln 5% vorhanden. Wahrscheinlich stammt nur ein geringerer Teil des übergehenden Furfurols aus Pentosanen, der größere Teil dürfte aus Uronsäurekomplexen (insbesondere Glucuron- und Galacturonsäuren) entstehen, die bei der Hydrolyse mit 12%iger HCl durch CO_2 -Abspaltung in Xylose bzw. Arabinose übergehen und dann Furfurol liefern (6).

Der Cellulosegehalt wurde anfangs nach der Methode von KÜRSCHNER und HANAK (8) festgestellt, durch Hydrolyse mit 80%iger Essigsäure und Oxydation des Lignins mit konz. HNO_3 . Diese Werte erschienen aber insbesondere dann zu hoch, wenn schon beständigere Humusstoffe im Rottematerial gebildet waren (nach etwa fünf Wochen Rottezeit). Im Gegensatz zum Lignin wurden diese Humusstoffe dann nicht mehr vollständig gelöst und oxydiert. Bei geringer Humusbildung (weniger als

fünf Wochen Rottezeit) konnten durch Auswaschen der Cellulose mit 0,5%iger NaOH noch brauchbare Ergebnisse erzielt werden. Die in den Tabellen angegebenen Cellulosewerte wurden einheitlich durch Hydrolyse mit 80%iger H_2SO_4 erhalten, als Glucose berechnet und mit dem Faktor 0,9 multipliziert.

Der in 80%iger H_2SO_4 nicht hydrolisierbare organische Rückstand enthält in frischem Pflanzenmaterial fast durchwegs kondensiertes und polymerisiertes Lignin neben einer geringen Menge künstlich humifizierter Substanz, die sich durch Einwirkung starker Säuren und Erhitzen aus Eiweißstoffen, Lignin u. a. bilden kann. In verrottetem, humushaltigem Pflanzenmaterial wird dieser nicht hydrolysierbare Rückstand als „Lignin-Humus-Komplex“ bezeichnet, da er beide Stoffgruppen sowie Übergänge und Zwischenprodukte enthält.

Ergebnisse

1. Zusammensetzung des Ausgangsmaterials (Tab. 1)

Für die biologische Zersetzung von organischem Material ist dessen Zusammensetzung von maßgebender Bedeutung. 40—45% des Strohaufwuchses (bezogen auf Trockensubstanz) entfallen auf Blätter und Lieschen, 35—40% auf Stengel und 15—20% auf Spindeln (1).

In Tabelle 1 ist der Gehalt des Maisstrohs an einigen Stoffgruppen aufgeführt, die für den Verlauf der Rotte von Wichtigkeit sind.

Tabelle 1:

Zusammensetzung des Maisstrohs (in % der organ. Substanz als Glühverlust)
(Durchschnittswerte aus mehreren Proben)

	Blätter	Stengel	Spindeln
pH (H_2O)	8,0	5,6	5,2
Gesamt-N	1,18	0,60	0,43
hydrolysierbarer N	1,02	0,45	0,30
wasserlöslicher N	0,39	0,24	0,04
C	45,0	45,3	43,2
C/N	38	76	100
Kohlenhydratfraktionen:			
I Direkt reduzierende Zucker (DRZ)	1,6	11,2	2,5
II nach Säureinversion reduzierende Zucker (Oligosaccharide)	1,0	6,1	0,3
III in 2%iger HCl hydrolysierbare Kohlenhydrate (HK)	29,4	23,4	37,2
IV in 12%iger HCl hydrolysierbare Kohlenhydrate (Pentosane)	31	25	36
V in 80%iger H_2SO_4 hydrolysierbare Kohlenhydrate (Cellulose)	37	36	39
in 80%iger H_2SO_4 nicht hydrolysierbarer organischer Rückstand	14	19	19

Gesamt-N, hydrolysierbarer und wasserlöslicher Stickstoff, pH-Wert und C/N-Verhältnis lassen erwarten, daß Maisblätter leicht, die Spindeln dagegen sehr schwer verrotten. In bezug auf die Kohlenhydratfraktionen unterscheiden sich die Stengel durch einen sehr hohen Zuckergehalt (im Mark) von den Blättern und Spindeln, die nur wenig mehr Zucker enthalten als Getreidestroh. Vergleichsweise

beträgt der Gehalt an GZ in Weizen-, Roggen- und Gerstenstroh etwa 1,8%, im Haferstroh etwa 2,7%. Die in 2%iger HCl hydrolysierbaren Kohlenhydrate (Fraktion III) erscheinen in den Stengeln relativ niedrig, in denen sie nach Entfernung der wasserlöslichen Zucker direkt bestimmt wurden.

Die GHK als Summe der Fraktionen I, II und III ergeben für Blätter einen erheblich niedrigeren Wert (32%) als für Stengel und Spindeln (rund 40%). Der Gehalt an Pentosanen (Fraktion IV) ist in den Stengeln am niedrigsten, in den Spindeln dagegen sehr hoch. Zum weitaus größten Teil sind die Pentosane in der Fraktion III mit enthalten, eine geringere Menge wird aber durch Hydrolyse mit 2%iger HCl nicht erfaßt (siehe Methodik!). Bei den Stengeln waren es 3,8%; demnach sind 21,2% Pentosane schon mit 2%iger HCl gelöst worden und in der Fraktion III enthalten — soweit sie nicht bei der Hydrolyse zerstört worden sind. Dementsprechend scheinen in der HCl-löslichen Fraktion (HK) der Blätter rund 27% und der Spindeln rund 32% Pentosane vorhanden zu sein. Der Gehalt an Methylpentosanen betrug in Blättern und Stengeln nur 0,12% der organischen Substanz, in den Spindeln waren solche nicht nachweisbar.

Der Anteil Cellulose (Fraktion V) ist in dem verschiedenen Pflanzenmaterial nur wenig verschieden; die Spindel sind vielleicht etwas cellulosereicher als Stengel und Blätter. Ein deutlicher Unterschied besteht jedoch im nicht-hydrolysierbaren organischen Rückstand, also vorwiegend dem Lignin, das in Stengeln und Spindeln stärker vertreten ist als in den Blättern.

Neben der chemischen Zusammensetzung hat zweifellos die verschiedenartige Struktur der Pflanzenteile entsprechend ihrem anatomischen Aufbau einen nicht minder großen Einfluß auf die Verrottung: die einheitliche und feingliedrige Beschaffenheit der Blätter begünstigt den Angriff der Mikroben im Gegensatz zu dem groben Stengelmaterial, das an der Außenseite mit einer starken Wachsschicht überzogen ist. Das sehr harte — an Samenschalen erinnernde — Gewebe der Spindeln dürfte dem mikrobiellen Abbau wesentlich stärkeren Widerstand entgegensetzen.

2. Veränderung der Reaktion und des C/N-Verhältnisses während der Rotte

Schon nach vier Tagen ist der pH-Wert des Blätter- bzw. Stengelmaterials von 3,0 bzw. 5,6 auf 8,4 angestiegen; der biologische Abbau setzt also sehr rasch ein, verbunden mit einer entsprechenden Ammoniakentwicklung.

Im weiteren Verlauf des Versuches nimmt die Reaktion bis 9,3 bzw. 10,1 zu. Das pH der Spindeln änderte sich zunächst nur sehr wenig, stieg dann in den ersten 20 Wochen bis auf etwa 9,4 an und ging schließlich wieder zurück; die Werte bleiben aber immer unter denen der anderen beiden Versuchsreihen (Tab. 2).

Durch Zusatz von NH_3 -entwickelnden Düngesalzen wurde der Reaktionsanstieg beschleunigt, durch Harnstoff oft mehr und stärker als durch Kalkstickstoff. Die höchsten pH-Werte treten aber nicht zu Beginn der Rotte auf, wenn die NH_3 -Entwicklung am stärksten ist (Tab. 3), sondern je nach Pflanzenmaterial erst nach etwa 15—20 Wochen. Dies hängt wahrscheinlich mit der Freisetzung von Basen (K, Na, Ca usw.) aus dem verrottendem Pflanzengewebe und der Bildung von stabilen Humaten zusammen.

Tabelle 2:

pH-Werte (H₂O-Aufschlammung) im Rottematerial

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
a) Blätter							
0	8,0	—	—	—	—	—	—
1	8,6	8,5	8,8	8,9	8,5	8,5	8,8
3	9,1	8,7	8,9	8,8	9,0	8,9	8,8
5	9,3	9,3	9,1	9,0	9,0	9,3	9,0
20	9,3	9,2	7,9	8,0	9,4	9,3	9,1
40	9,1	8,8	7,5	7,3	8,6	7,4	9,1
b) Stengel							
0	5,6	—	—	—	—	—	—
1	8,7	8,7	8,8	8,9	8,8	8,8	8,7
3	9,2	9,0	9,0	8,9	9,0	9,1	8,7
5	9,4	9,2	9,3	9,1	9,2	9,1	9,1
20	10,0	10,0	10,1	9,7	9,7	9,8	9,7
40	9,9	9,9	10,1	10,0	10,0	9,2	9,8
c) Spindeln							
0	5,2	—	—	—	—	—	—
1	6,0	8,8	9,1	9,3	6,5	7,3	7,9
3	6,4	9,1	9,1	9,4	8,0	8,2	8,6
5	7,4	9,0	9,1	9,1	9,3	9,1	9,1
20	9,0	7,5	6,7	7,8	9,2	9,1	9,8
40	6,8	7,0	7,6	7,1	8,7	8,2	8,4

In den Harnstoffgruppen tritt eine stoßartige NH₃-Entwicklung in der ersten Woche auf verbunden mit der Gefahr von hohen Stickstoffverlusten; in den Gruppen K₁ und K₂ ist die Ammoniakbildung dagegen sehr gering und wird erst nach dem Abklingen der Cyanamidphase und einer weiteren Verengung des C/N-Verhältnisses angeregt; lediglich bei hoher Kalkstickstoffgabe kann offenbar das freiwerdende Ammoniak infolge anfänglicher starker Hemmung der biologischen Aktivität durch hohe Cyanamid- bzw. Dicyandiamid-Konzentrationen nicht ausreichend gebunden werden.

Das C/N-Verhältnis der Maisblätter verengt sich innerhalb von fünf Wochen von 38 auf 27 (O-Gruppe) bzw. maximal 12 je nach N-Form und -Gabe. Nach 20 Wochen sind die Unterschiede zwar noch gering, bei Versuchsende liegen die Quotienten zwischen 8 und 12 ohne wesentliche Differenzen zwischen

Tabelle 3:

NH₃-Gehalt am Beginn der Rotte von Maisblättern

Rottezeit (Wochen)	Versuchsgruppen					
	H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	0,19	0,22	0,28	0,01	0,03	0,14
3	0,01	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02
5	0,01	0,06	0,03	0,10	0,11	0,05

Tabelle 4:

C/N-Verhältnis im Rottematerial

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
a) Blätter							
0	38	27	21	17	27	21	17
1	31	23	21	24	21	21	18
3	29	19	19	17	19	15	14
5	27	19	16	16	22	16	12
20	16	13	13	12	14	11	10
40	11	10	10	10	12	10	8
b) Stengel							
0	76	41	28	22	41	28	22
1	65	43	40	46	40	29	23
3	59	39	36	33	37	24	18
5	56	34	29	21	35	24	17
20	43	21	19	17	19	16	13
40	16	12	11	11	11	10	8
c) Spindeln							
0	100	48	31	23	48	31	23
1	100	81	65	64	50	34	24
3	91	65	70	66	50	29	24
5	87	53	61	63	44	29	22
20	78	35	42	44	31	19	16
40	38	30	28	26	23	16	11

den N-Formen. Das C/N-Verhältnis der Stengel wird im Verlaufe der Rotte gleichmäßig enger und erreicht schließlich Werte zwischen 16 (ohne N) und 8 (K₃). In den höheren Kalkstickstoffgruppen wird schon wesentlich früher der Endpunkt der übrigen Versuchsglieder erreicht. Obwohl der Abbau in der Kontrollgruppe bedeutend langsamer verläuft, wird die Zersetzung des Stengelmaterials überhaupt — trotz eines ursprünglich relativ weiten C/N-Verhältnisses (76) — doch sehr begünstigt durch den hohen Gehalt an biologisch leicht zersetzbaren Zuckerfraktionen. Verluste von Stickstoff (siehe später!) insbesondere in den Gruppen H₂ und H₃ führen zu einer zeitweiligen Erweiterung des C/N-Verhältnisses (1. Woche). Der Abbau der Spindeln geht insbesondere bei Stickstoffmangel sehr langsam vor sich; das C/N-Verhältnis ändert sich in den ersten Wochen nur sehr wenig und erreicht auch nach 40 Wochen nur in der K₂- und K₃-Gruppe den für organische Dünger anzustrebenden Wert von < 20. Durch Kalkstickstoff wird der Abbau gleichmäßig beschleunigt. Höhere Harnstoffgaben hemmen die Rotte anfangs sogar; das C/N-Verhältnis wird insbesondere in den ersten Wochen der Rotte weiter, bedingt durch starke N-Verluste in Form von Ammoniak, und verengt sich erst wieder gegen Ende der Rottezeit.

3. Abbau der organischen Stoffgruppen

Der Abbau der organischen Substanz beginnt mit den Zuckern, die von den Mikroben als Nahrungs- und Energiestoffe unmittelbar verwertet werden können. Di- und Trisaccharide werden offenbar sehr rasch enzymatisch gespalten.

Tabelle 5:

Abbau der Zucker in Maisstengeln im Verlauf einer siebentägigen Rotte

Rottezeit (Tage)	Organ. Substanz		Gesamt. Zucker		Oligosaccharide		Direkt red. Zucker	
	g	%	g	%	g	%	g	%
0	40,0	100	7,00	100	2,28	100	4,72	100
2	39,5	99	6,70	96	0,23	10	6,47	137
4	37,0	93	2,40	34	0,14	6	2,26	48
7	35,6	90	1,08	15	0,03	1	1,05	22

In einem Modellversuch (Tab. 5) wurde (zuckerreiches!) fein gemahlene Stengelmaterial angefeuchtet und einer siebentägigen Rotte unterworfen.

Nach zwei Tagen hat die organische Substanz um 0,5 g (= 1%) der Gesamtzucker um 0,3 g (= 4%) abgenommen. Die „Oligosaccharide“ sind dagegen von 2,28 g auf 0,23 g (= 90%) zurückgegangen, während im gleichen Zeitraum die direkt reduzierenden Zucker von 4,72 auf 6,47 g (= um 37%) angestiegen sind als Folge der Di- und Trisaccharidspaltung. Nach sieben Tagen waren 85% der Gesamtzucker von den Mikroorganismen aufgebraucht, „Oligosaccharide“ waren nur mehr in Spuren (1%) vorhanden.

a) Maisblätter

Sind die Voraussetzungen für eine intensive mikrobielle Tätigkeit gegeben, so werden aber auch andere organische Stoffgruppen von Anfang an stark angegriffen.

Tabelle 6:

Abbau der organischen Substanz im Verlauf der Rotte von Maisblättern
(300 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	75	59	62	69	65	79	86
3	67	53	53	53	56	57	59
5	63	48	51	51	55	54	52
10	45	38	40	40	41	43	44
15	34	31	35	33	36	35	42
20	28	29	34	32	32	34	37
25	27	27	28	28	29	29	36
40	24	21	23	21	24	24	26

Die organische Substanz der Maisblätter (Tab. 6) erlitt in der ersten Woche der Rotte die größten Verluste; in der O-Gruppe (ohne N-Zusatz) waren noch 75%, nach 5 Wochen nur mehr 63% und am Ende des Versuches 24% von der Ausgangssubstanz übrig. In der H₁-Gruppe wurde durch den Zusatz von 0,5% N als Harnstoff — insbesondere in der ersten Zeit — die Zersetzung erheblich beschleunigt: nach einer Woche waren 59%, nach 5 Wochen 48% und nach 40 Wochen nur mehr 21% der organischen Substanz verblieben (einschließlich der

neu gebildeten Humusstoffe). Für H_2 (1% N als Harnstoff) betragen die entsprechenden Werte 62 bzw. 51% bzw. 23%. In der H_3 -Gruppe ist der Rückgang nach einer Woche geringer (Rest 69%); die Ursache dürfte in einer zeitweiligen Hemmung des mikrobiellen Abbaues infolge starker NH_3 -Entwicklung und dem dadurch bedingten hohen pH-Wert zu suchen sein. In den Kalkstickstoffgruppen verzögert (papierchromatographisch deutlich nachgewiesenes) Cyanamid anfangs die Rotte: so sind in der K_3 -Gruppe nach einer Woche noch 86% der organischen Substanz vorhanden; von der dritten Woche ab geht der Abbau dann rascher vor sich, offenbar ohne stärkere Bildung von freiem Ammoniak. Da in dieser Gruppe aber schon nach 5 Wochen eine starke Humusbildung (siehe später!) einsetzt, ist der Rückgang an organischer Substanz damit geringer.

Nach 40 Wochen sind in allen Versuchsgruppen mit Ausnahme von K_3 (höherer Humusgehalt!) nur mehr 24—21% organische Substanz (einschließlich der neu gebildeten Humusstoffe) vorhanden.

Tabelle 7:

Abbau der Cellulose im Verlauf der Rotte von Maisblättern
(94 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		K_3
		H_1	H_2	H_3	K_1	K_2	
1	85	57	62	65	61	78	88
3	59	38	44	47	48	52	50
5	48	28	34	34	40	39	30
10	27	15	19	21	24	22	22
15	12	10	14	13	12	13	19
20	9	9	7	12	12	12	14
25	6	7	6	9	9	10	14
40	6	7	6	6	7	7	9

Die Cellulose in Maisblättern (Tab. 7) wird in der Kontrollgruppe in der ersten Woche nur sehr wenig (zu 15%), in den Gruppen mit N-Zusatz dagegen sehr stark (zu 35—40%) angegriffen. In den ersten 5 Wochen der Rotte wird im Versuchsglied „ohne N“ gut die Hälfte der Cellulose abgebaut, in den Harnstoffgruppen und in der Behandlungsart K_3 rund zwei Drittel. Der Celluloseabbau ist also sehr abhängig von der N-Zufuhr und erfolgt leichter und schneller als der der HK und Pentosane (siehe später). Eine Stickstoffgabe von 0,5% als Harnstoff scheint für den Celluloseabbau am günstigsten zu sein. Nach 40 Wochen beträgt der Rückstand an Cellulose in allen Gruppen nur noch 6—8% gegenüber 10—13% der hydrolysierbaren Kohlenhydrate (siehe Tab. 9); letztere dürften in diesem Rottestadium vorwiegend aus Hemicellulosen und Uronsäurekomplexen bestehen (auf die organische Substanz bezogen sind das 7—8% Cellulose bzw. 13—15% Hemicellulosen). In mitteleuropäischen Ackerböden beträgt der Gehalt an Cellulose vergleichsweise 5—7%, der an Hemicellulosen 8—14% in der organischen Substanz. Ein Teil der Cellulose ist in Wurzelresten enthalten, ein Teil der Hemicellulosen wird in den Mikroben selbst neu gebildet.

Tabelle 8:

Abbau der Pentosane im Verlauf der Rotte von Maisblättern
(104 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff		Kalkstickstoff	
		H ₁	H ₃	K ₁	K ₃
5	57	35	34	50	30
10	35	18	21	26	20
15	17	14	16	17	17
20	12	13	15	13	15
25	10	13	13	13	13
40	9	8	11	12	10

Die Pentosane bilden den Hauptteil der hydrolysierbaren Kohlenhydrate (der Abbau wurde infolge Materialmangel erst ab 5 Wochen in einigen wenigen Versuchsreihen verfolgt); sie werden insgesamt etwas leichter zersetzt als diese, besonders dann, wenn der Abbau der Zucker (nach 5 Wochen) nahezu abgeschlossen ist (Tab. 8). In den HK muß demnach eine, wenn auch mengenmäßig geringe Stoffgruppe enthalten sein, die biologisch schwerer angreifbar ist als die Pentosane. Es handelt sich dabei wahrscheinlich um Uronsäurekomplexe (6), die nach SPRINGER im Getreidestroh zu etwa 5% als Uronsäureanhydrid (an Kohlenhydrate, Pektine, Lignin usw. gekoppelt) in der organischen Substanz vorhanden sind und sich im Verlaufe der Rotte anreichern (7), da sie z. T. biologisch schwer angegriffen und auch von den Mikroben selbst neu gebildet werden. Die Pentosane werden in den Blättern etwas langsamer zersetzt als Cellulose, bei hohem N-Gehalt (besonders in H₃ bzw. K₃) aber genauso rasch abgebaut wie diese.

Tabelle 9:

Abbau der hydrolysierbaren Kohlenhydrate (HK) im Verlauf der Rotte von Maisblättern

(98 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	73	62	59	64	66	73	85
3	58	49	47	48	47	50	52
5	54	41	38	40	45	42	39
10	37	27	28	27	32	29	27
15	21	20	22	20	22	21	22
20	16	20	21	20	20	19	20
25	13	17	15	14	15	15	20
40	10	12	11	11	10	11	13

Die hydrolysierbaren Kohlenhydrate (HK) stellen eine uneinheitliche Stoffgruppe dar, bestehend zu einem geringen Teil aus Zuckern, zum weitaus größten Teil aber aus Pentosanen neben etwas Stärke, Pektinen, Uronsäuren und dgl. (Tab. 9). Zum Teil werden sie leicht (einfache Kohlenhydrate), z. T. aber

schwerer zersetzt; letzteres gilt vor allem für die Zellwand- und Gerüststoffe (Xylane, Galaktane usw.). Nach einem raschen Abbau der zuckerartigen Verbindungen tritt zunächst eine gewisse Verlangsamung der Rotte ein. Der leicht verfügbare Stickstoff im Blättermaterial scheint gerade ausreichend zu sein für die Zersetzung von Zucker, Stärke und etwas Cellulose. Nach etwa 2—3 Wochen wird in den N-Gruppen, nach 3—4 Wochen in der O-Gruppe die Cellulose stärker abgebaut als die Pentosane bzw. hydrolysierbaren Kohlenhydrate. Durch Stickstoffzusatz wird die Zersetzung der HK allgemein erheblich beschleunigt, wenn auch anfänglich eine gewisse Hemmung durch hohe N-Gaben (besonders in K₃) aus den schon genannten Gründen festzustellen ist. Nach 40 Wochen sind in allen Versuchsgruppen rund 90% dieser Kohlenhydratfraktion abgebaut.

Der Gehalt an direkt reduzierenden Zuckern sowie Oligosacchariden ist in den Maisblättern sehr gering.

Tabelle 10:

Abbau der Zucker im Verlauf der Rotte von Maisblättern
(g/Gefäß)

Rottezeit (Wochen)	0		H ₁		H ₂		K ₁		K ₃	
	DRZ	Oligo- saccharide	DRZ	Oligo- saccharide	DRZ	Oligo- saccharide	DRZ	Oligo- saccharide	DRZ	Oligo- saccharide
0	4,8	3,1	4,8	3,1	4,8	3,1	4,8	3,1	4,8	3,1
1	4,8	0	4,0	0	3,3	1,8	2,5	0,9	4,5	1,8
2	2,3	1,7	1,6	1,9	1,8	1,6	2,1	1,4	2,2	3,3
3	1,8	1,1	1,4	1,1	1,6	0,9	1,3	1,2	1,5	1,4
4	0,8	1,0	0,6	1,6	1,1	1,2	0,6	1,3	0,9	1,0
5	0,6	0,9	0,6	0,8	0,6	0,4	0,6	1,0	0,9	0,8

Schon nach einer Woche ist der größte Teil der Di- bzw. Trisaccharide abgebaut (Tab. 10), nach 5 Wochen ist etwa noch ein Viertel übrig. Auch der Gehalt an DRZ geht rasch zurück, wenngleich bei einem intensiven Abbau hochmolekularer Kohlenhydrate ständig eine gewisse Menge von Kohlenhydratbruchstücken anfällt, die durch diese Methoden nunmehr erfaßt werden. Eine Beschleunigung des Zuckerabbaues durch N-Zusatz — auch am Beginn der Rotte — ist nicht festzustellen, weil das günstige C/N-Verhältnis der Maisblätter wahrscheinlich genügend Stickstoff liefert für den Bedarf dieser offenbar nicht sehr stickstoffbedürftigen Mikroorganismengruppen.

b) Maisstengel

Die Zersetzung der Stengel zeigt aufgrund ihrer Beschaffenheit (grobe Struktur, Verholzung, Wachsschicht an den Außenwänden) und insbesondere ihres hohen Zuckergehaltes einen etwas andersartigen Verlauf.

Die organische Substanz (Tab. 11) geht in den ersten Wochen der Rotte in der O-Gruppe zunächst in etwa gleichem Umfange zurück wie in den Blättern (Veratmung der Zucker); dann verlangsamt sich der Abbau infolge N-Mangels, und nach 25 Wochen sind noch 48% der organischen Substanz vorhanden (gegenüber 27% in den Blättern). Durch N-Zusatz kann die Rotte beschleunigt

Tabelle 11:

Abbau der organ. Substanz im Verlauf der Rotte von Maisstengeln
(300 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	75	69	66	72	76	78	82
3	74	58	53	56	65	64	60
5	73	53	50	53	60	60	54
10	64	51	49	46	56	43	48
15	60	38	37	36	45	38	40
20	54	37	36	32	37	35	36
25	48	36	33	32	36	30	32
40	39	30	26	23	29	27	23

werden (nach 10 Wochen ist etwa die Hälfte der Ausgangsmenge abgebaut), jedoch nicht in dem Umfang wie in den leicht zersetzbaren Blättern. Höhere N-Gaben bewirken anfangs eine leichte Verzögerung, fördern aber später den Abbau stärker: so sind nach 25 Wochen in den Gruppen H₁ und K₁ noch jeweils 36%, in H₂ und K₂ nur mehr 30—33% der organischen Substanz vorhanden. Nach 40 Wochen sind in der Mehrzahl der Fälle $\frac{3}{4}$ der Ausgangsmenge zersetzt.

Tabelle 12:

Abbau der Cellulose im Verlauf der Rotte von Maisstengeln
(93 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	98	86	85	93	96	96	99
3	91	70	76	70	81	74	67
5	86	60	69	70	77	63	60
10	73	47	49	43	59	39	40
15	66	32	34	30	41	29	30
20	61	30	30	24	28	25	27
25	60	27	24	23	26	17	25
40	48	22	19	17	22	12	22

Der Celluloseabbau in den Stengeln (Tab. 12) geht insbesondere ohne N-Zugabe wesentlich langsamer vor sich als in den Blättern; insgesamt wird im Verlaufe von 40 Wochen nur etwa die Hälfte der Ausgangsmenge angegriffen. In den Versuchsgruppen mit Stickstoffzusatz ist dieser Stand dagegen bereits nach rund 10 Wochen erreicht, und am Ende des Versuches ist die Cellulose zu 80% zersetzt. Innerhalb der N-Steigerung sowie zwischen den Stickstoffformen bestehen keine wesentlichen Unterschiede in der Verrottungsgeschwindigkeit.

Tabelle 13:

Abbau der Pentosane im Verlauf der Rotte von Maisstengeln
(75 g zu Versuchsbeginn, Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff		Kalkstickstoff	
		H ₁	H ₃	K ₁	K ₃
5	76	64	65	76	57
10	68	48	44	52	37
15	61	33	29	39	29
20	57	29	24	29	25
25	51	27	23	24	21
40	44	21	16	17	15

Die Pentosane werden aufgrund des weiteren C/N-Verhältnisses der Stengel wesentlich langsamer abgebaut als in den Blättern (Tab. 13). Während der Rückstand in der Kontrollgruppe der Blätter nach 20 Wochen nur mehr 12% beträgt, sind in den Stengeln ohne N-Zusatz noch etwas mehr als die Hälfte übriggeblieben.

In den Versuchsgliedern mit Stickstoff erfolgt der Abbau dagegen sehr viel schneller, besonders intensiv in der Gruppe K₃, wo nach 20 Wochen bereits $\frac{3}{4}$ und bei Versuchsende 85% der Pentosane zersetzt sind. Der Abbau dieser Stoffgruppen ist daher ähnlich wie der der Cellulose von der Stickstoffkonzentration stark abhängig.

Tabelle 14:

Abbau der hydrolysierbaren Kohlenhydrate im Verlauf der Rotte von Maisstengeln
(70 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	110	89	87	94	97	95	90
3	97	70	70	70	84	80	69
5	86	64	61	62	75	70	60
10	73	56	47	45	64	44	42
15	65	40	35	33	48	34	33
20	59	36	30	29	36	27	29
25	55	33	27	29	32	24	26
40	33	20	19	19	21	19	17

Der Abbau der hydrolysierbaren Kohlenhydrate (Tab. 14) verläuft gegenüber den Pentosanen in den ersten 5 Wochen etwas langsamer — insbesondere in der Kontrollgruppe. Bis zur 15. Woche sind in den Versuchsgliedern mit N-Zusatz meist mehr als 60%, nach 40 Wochen etwa 80% der Ausgangsmenge verrottet, während in der O-Gruppe am Ende des Versuches noch $\frac{1}{3}$ verblieben ist.

Die Zucker werden außerordentlich rasch abgebaut (Tab. 15). In der ersten Woche ging die Gesamtzuckermenge in der O-Gruppe von 52 g bis auf 2,5 g (= etwa 5%) zurück, in den Kalkstickstoffgruppen — insbesondere bei K₃ — ist

Tabelle 15:

**Abbau der Zucker im Verlauf der Rotte von Maisstengeln
(g/Gefäß)**

Rottezeit (Wochen)	0		H ₁		H ₂		K ₁		K ₂	
	DRZ	Oligo- saccharide	DRZ	Oligo- saccharide	DRZ	Oligo- saccharide	DRZ	Oligo- saccharide	DRZ	Oligo- saccharide
0	34,0	18,0	34,0	18,0	34,0	18,0	34,0	18,0	34,0	18,0
1	1,7	0,8	1,3	0,8	1,5	1,0	2,0	0,9	2,9	4,8
2	1,4	0,9	1,2	1,0	1,3	0,6	1,8	0,7	2,2	3,0
3	1,3	1,0	1,1	1,0	1,1	0,7	1,4	1,1	1,5	2,7
4	1,1	1,1	0,9	1,0	1,2	0,2	1,2	1,1	1,3	2,4
5	1,0	0,9	1,0	0,8	1,0	0,4	1,2	0,9	1,2	2,4

eine vorübergehende Hemmung der Zersetzung durch Cyanamid bemerkbar (nach einer Woche waren noch etwa 15% Zucker der Ausgangsmenge vorhanden!). Die Verwertung eines so reichlichen Zuckerangebotes in den Stengeln durch die Mikroben erfordert aber große Mengen Stickstoff, der — im Gegensatz zu den Blättern — sogar der schwer verfügbaren HCl-unlöslichen N-Fraktion entzogen wurde.

Einem Verlust von rund 50 g Gesamtzucker in der ersten Woche steht aber eine Zunahme von etwa 7 g hydrolysierbaren Kohlenhydraten gegenüber (Tab. 14). Die Ursache liegt wohl darin, daß durch die Veratmung so großer Zuckermengen eine große Masse Mikrobenleiber entsteht, die z. T. Schleimstoffe, hemizellulose- und chitinartige Stoffe enthalten und durch die Hydrolyse mit erfaßt werden. Außerdem können durch die der Hydrolyse vorangegangene Wasserextraktion (siehe Methodik!) zuckerartige Stoffe wie Pektine und dgl. in Lösung gegangen sein, die in diesem Zeitraum noch nicht biologisch abgebaut sind und daher in der HK-Fraktion erscheinen. In der O-Gruppe nehmen die HK erst nach 3 Wochen ab, während in den N-Gruppen von Anfang an ein gewisser Abbau festzustellen ist. Im allgemeinen wird diese Stoffgruppe aber ebenso wie in den Blättern etwas schwerer zersetzt als Cellulose und Pentosane.

Ein Vergleich der Ergebnisse in den Tabellen 11—14 mit denen der Tabellen 6—9 läßt unschwer erkennen, daß der Einfluß einer N-Zugabe auf den Abbau der Stengel (C/N = 76) wesentlich wirksamer ist als auf die Zersetzung der Blätter (C/N = 38).

c) Maisspindeln

Die Verrottung des stickstoffarmen Spindelgewebes braucht erwartungsgemäß sehr viel mehr Zeit als die der Blätter und Stengel.

Nach einer Woche sind in allen Versuchsgruppen noch 95—100% der Ausgangsmenge an organischer Substanz vorhanden (Tab. 16), nach 5 Wochen noch 83—85%, und erst nach 25 Wochen sind 30% (Kontrollgruppe) bzw. rund 50% (N-Gruppen) abgebaut. (Zum Vergleich sind im gleichen Zeitraum Blätter zu 64—73% und Stengel zu 52—68% abgebaut.) Während die Zersetzung in den Kalkstickstoffgruppen anfangs etwas gehemmt ist, liegt sie bei Versuchsende höher als in den Harnstoffgruppen.

Tabelle 16:

Abbau der organ. Substanz im Verlauf der Rotte von Maisspindeln
(300 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	97	95	96	97	98	99	100
3	94	92	92	93	92	94	95
5	85	84	83	84	84	83	83
10	78	73	76	77	77	72	74
15	75	62	67	70	66	61	65
20	71	54	63	64	55	51	56
25	70	50	58	58	48	43	49
40	67	45	50	50	44	36	31

Tabelle 17:

Abbau der Cellulose im Verlauf der Rotte von Maisspindeln
(107 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	98	98	92	99	98	96	100
3	95	95	93	98	92	88	95
5	87	84	86	85	84	81	83
10	79	67	78	75	76	69	75
15	72	54	67	71	68	63	69
20	69	43	63	62	55	52	60
25	67	39	58	60	49	46	51
40	62	30	43	43	34	34	38

Tabelle 18:

Abbau der Pentosane im Verlauf der Rotte von Maisspindeln
(107 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff		Kalkstickstoff	
		H ₁	H ₃	K ₁	K ₃
5	87	89	86	79	79
10	76	70	78	72	67
15	74	64	69	62	54
20	66	45	61	48	42
25	66	43	59	43	36
40	61	39	49	39	27

Die Cellulose wird insbesondere in der ersten Zeit sehr langsam abgebaut; in der O-Gruppe sind bei Versuchsende noch 62% Rückstand vorhanden. Durch N-Zusatz setzt etwa von der 10. Woche ab eine wesentliche Beschleunigung ein, so daß nach 40 Wochen nur mehr 30—40% zurückbleiben.

Der Abbau der Pentosane (Tab. 18) verläuft anfänglich ähnlich schleppend wie der der Cellulose. In der Kontrollgruppe wird innerhalb von 40 Wochen

Tabelle 19:

Abbau der hydrolysierbaren Kohlenhydrate im Verlauf der Rotte von Maisspindeln
(110 g zu Versuchsbeginn; Rückstand in % der Ausgangsmenge)

Rottezeit (Wochen)	0	Harnstoff			Kalkstickstoff		
		H ₁	H ₂	H ₃	K ₁	K ₂	K ₃
1	101	99	98	98	99	99	101
3	100	95	89	95	94	90	96
5	88	85	83	85	86	78	79
10	83	71	74	75	75	65	63
15	80	58	65	68	66	55	54
20	80	49	61	63	54	45	43
25	77	47	55	59	47	41	37
40	60	40	48	51	44	35	32

kaum mehr als $\frac{1}{3}$ der Ausgangsmenge zersetzt. Die Verrottung wird durch Stickstoffzusatz deutlich gefördert; der rascheste Abbau ist in der K₃-Gruppe zu beobachten, in der zu Versuchsende nur mehr 27% Rückstand verbleibt.

Die hydrolysierbaren Kohlenhydrate (Tab. 19) werden ähnlich wie die Cellulose und Pentosane innerhalb von 40 Wochen in der Kontrollgruppe nur zu 40% abgebaut. N-Zusatz fördert die Zersetzung der HK beträchtlich. Insgesamt geht der Abbau von Cellulose, Pentosanen und HK in den Spindeln nur sehr langsam vor sich, wohl bedingt durch die besondere Struktur und die starke Verholzung des Spindelgewebes, denn — abgesehen von einem etwas höheren Lignin- und Cellulosegehalt — unterscheiden sich die Spindeln in ihrer chemischen Zusammensetzung nicht wesentlich von den Blättern und Stengeln.

Tabelle 20:

Abbau der Zucker im Verlauf der Rotte von Maisspindeln
(g/Gefäß)

Rottezeit (Wochen)	0		H ₁		H ₃		K ₁		K ₃	
	DRZ	Oligo-saccharide	DRZ	Oligo-saccharide	DRZ	Oligo-saccharide	DRZ	Oligo-saccharide	DRZ	Oligo-saccharide
0	7,5	0,9	7,5	0,9	7,5	0,9	7,5	0,9	7,5	0,9
1	1,3	1,1	1,3	1,6	1,3	1,5	1,4	4,0	3,2	4,1
2	1,1	1,2	0,8	1,6	1,1	1,2	1,3	2,9	2,8	4,9
3	0,9	1,1	0,8	1,2	0,8	1,1	1,0	3,0	2,4	4,2
4	0,8	1,1	0,7	1,1	0,5	1,3	0,7	1,9	1,8	2,4
5	0,7	1,0	0,6	0,9	0,4	1,2	0,6	1,2	1,5	1,2

Die besonders im Spindelmark enthaltenen Zucker werden ebenso rasch veratmet wie in den Stengeln (Tab. 20). Nach einer Woche ist der weit größte Teil abgebaut; durch zeitweilig höhere Cyanamidkonzentrationen (K₂ und K₃) besteht anfänglich eine deutliche Hemmung.

4. Verlauf der Rotte

Aus dem bisher Gesagten ergibt sich folgendes Bild über den Verlauf der Rotte: Die Zucker werden von den Mikroorganismen sofort angegriffen und je nach dem Angebot in allen Pflanzenteilen außerordentlich rasch abgebaut (Tab. 10, 15, 20). So sind binnen einer Woche im Blättermaterial 3,1 g, in den Stengeln 49,5 g und in den Spindeln 6,0 g Gesamtzucker veratmet worden. Der Abbau der Zucker wird durch den N-Gehalt des Materials bzw. die zugesetzte Stickstoffmenge nicht beeinflusst. Offenbar ist der Stickstoffbedarf dieser Mikroorganismengruppe gering; zum Teil erfolgt sicherlich auch eine autolytische Zersetzung durch freiwerdende Pflanzenenzyme.

Dagegen hängt der Abbau der Cellulose, Pentosane und hydrolysierbaren Kohlenhydrate weitgehend ab vom C/N-Verhältnis des Materials (Abb. 1, 2, 3).

Je stickstoffärmer das Ausgangsmaterial, um so wirksamer ist der zugesetzte Stickstoff; demnach ist die Rottebeschleunigung durch 0,5% N als Harnstoff im Blättermaterial (C/N = 38) überhaupt gering, in den Stengeln (C/N = 76) bis zum Ende des Versuches sehr stark; in den Spindeln kommt der zugesetzte Stickstoff aufgrund der Struktur und des Verholzungsgrades dieser Pflanzenteile erst später zur Wirkung, führt aber dann zu einer Verdoppelung des Umsatzes. Die mikrobielle Zersetzbarkeit der verschiedenen Stoffgruppen ist demnach von mehreren Faktoren abhängig.

Abbau der Cellulose im Maisstroh
ohne (o.N) und mit Zusatz von 0,5%N als Harnstoff (H₁)

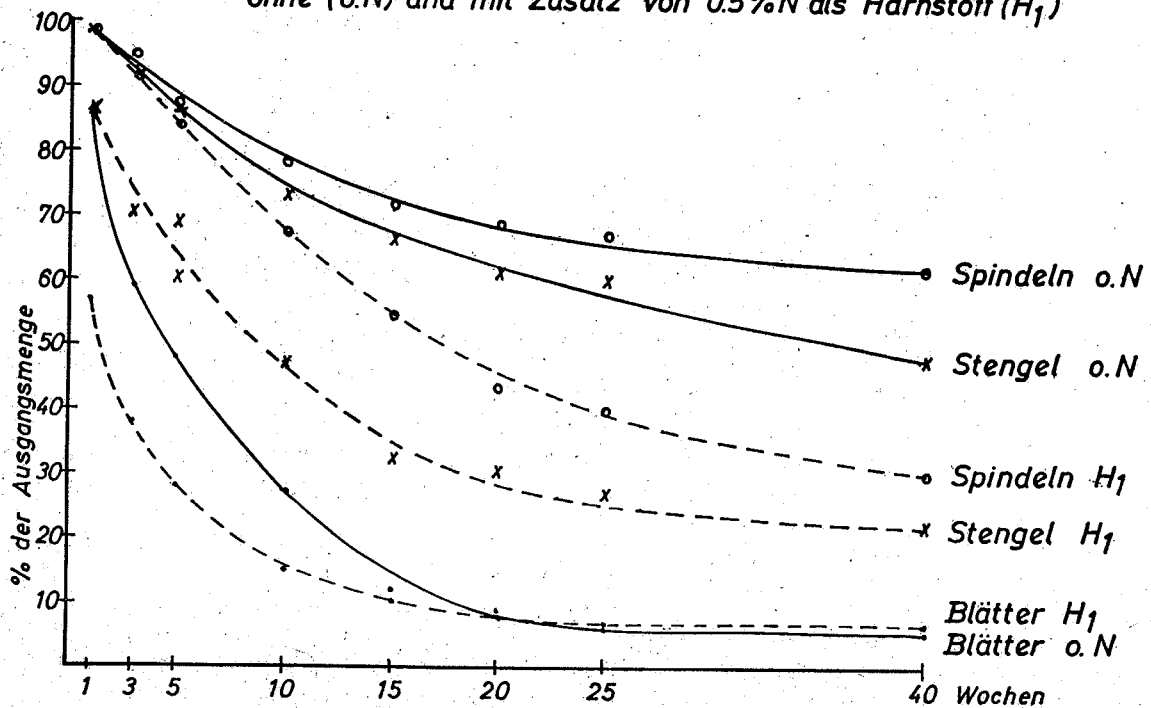


Abb. 1

Abbau der Pentosane im Maisstroh

ohne (o.N) und mit Zusatz von 0.5%N als Harnstoff (H₁)

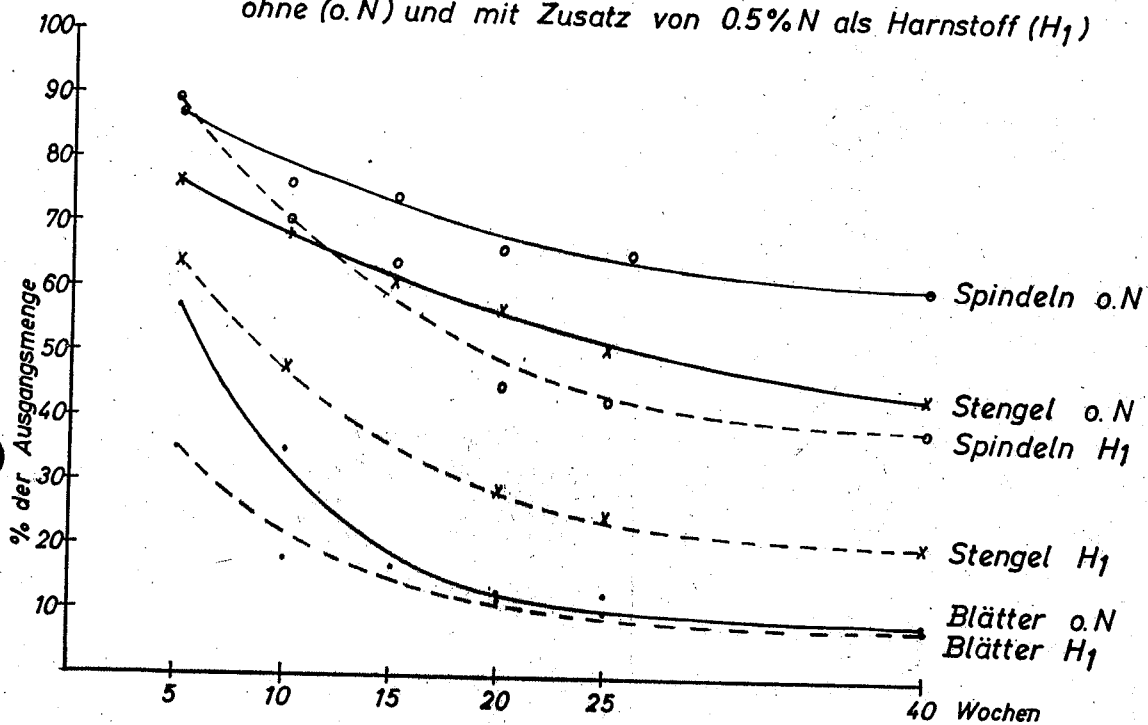


Abb. 2

Abbau der hydrolysierbaren Kohlenhydrate im Maisstroh

ohne (o.N) und mit Zusatz von 0.5%N als Harnstoff (H₁)

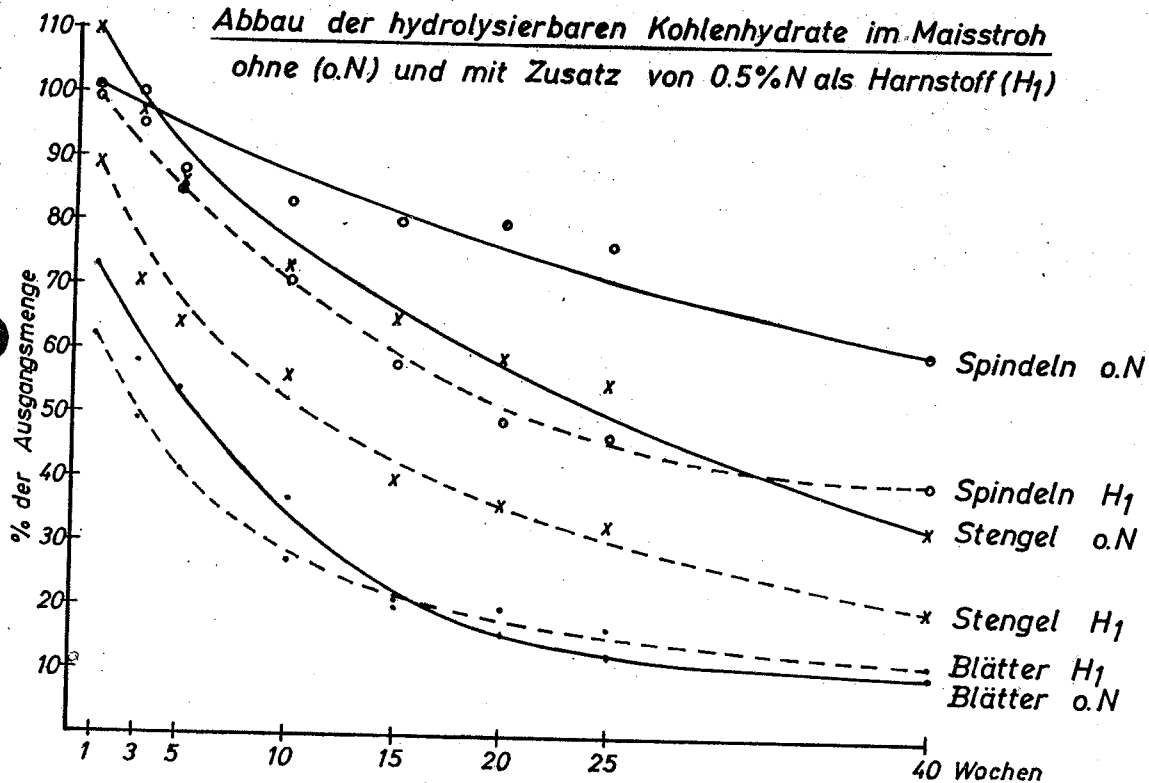


Abb. 3

5. Wirkung der N-Form auf den Ablauf der Rotte

Wie aus den entsprechenden Tabellen hervorgeht, werden 0,5% N (bezogen auf die organische Substanz) als Harnstoff (H_1) offenbar von den Mikroorganismen ohne große Verluste verarbeitet; bei höheren Harnstoffgaben treten jedoch erhebliche Verluste in Form von Ammoniak auf. Die N-Lieferung aus dem Kalkstickstoff braucht etwas längere Zeit; hinzu kommt, daß höhere Cyanamidkonzentrationen die mikrobielle Zersetzung zeitweilig hemmen. Vergleicht man dazu den Abbau der verschiedenen Kohlenhydratfraktionen in den K_1 - bzw. K_3 -Gruppen mit der H_1 -Gruppe, dann ergibt sich folgendes Bild (Tab. 21):

Tabelle 21:

Wirkung der N-Formen auf den Ablauf der Verrottung
(mehr [+] bzw. weniger [-] Rückstand [%] von K_1 bzw. K_3 gegenüber H_1)

Rottematerial Rottezeit (Wochen)	Cellulose		Pentosane		hydrol. KH	
	K_1	K_3	K_1	K_3	K_1	K_3
Blätter						
1	+ 4	+31	—	—	+ 4	+13
5	+12	+ 2	+15	— 5	+ 4	— 2
10	+ 9	+ 7	+ 8	+ 2	+ 5	± 0
20	+ 3	+ 5	± 0	+ 2	± 0	± 0
40	± 0	+ 2	+ 4	+ 2	— 2	+ 1
Stengel						
1	+10	+13	—	—	+ 8	+ 1
5	+17	± 0	+12	— 7	+11	— 4
10	+12	— 7	+ 4	—11	+ 8	—14
20	— 2	— 3	± 0	— 4	± 0	— 7
40	± 0	± 0	— 4	— 6	+ 1	— 3
Spindeln						
1	± 0	+ 2	—	—	± 0	+ 2
5	± 0	— 1	—10	—10	+ 1	— 6
10	+ 9	+ 8	+ 2	— 3	+ 4	— 8
20	+12	+17	+ 3	— 3	+ 5	— 6
40	+ 4	+ 8	± 0	—12	+ 4	— 8

Der Ersatz des Harnstoffs (H_1) durch gleiche N-Mengen als Kalkstickstoff (K_1) bewirkt eine zeitweilige Hemmung des Abbaues von Cellulose, Pentosanen und hydrolysierbaren Kohlenhydraten bis zu 17%. Diese Hemmung hält bei der Verrottung der Stengel, die sehr viel leichtzersetzbares Material und wenig pflanzeneigenen Stickstoff enthalten, länger an als in den stickstoffreichen Blättern. In den N-armen Spindeln beginnt der Abbau der Cellulose überhaupt erst nach etwa 10 Wochen — nachdem die Struktur dieses Materials bis zu einem gewissen Grade zerstört und dadurch den Cellulosezersetzern zugänglich gemacht wurde —, sie ist aber bei Versuchsende noch in vollem Gange. Die höhere Kalkstickstoffgabe (K_3) hemmt zwar anfangs den Celluloseabbau stärker; es hat aber den Anschein, als ob gewisse Mikroorganismen nach einer vorübergehenden lag-Phase (möglicherweise nach Bildung eines adaptiven cyanamidabbauenden Enzyms) in der Lage wären,

das hohe Cyanamidangebot direkt zu nutzen. Dagegen ist der Abbau der Pentosane und HK schon nach 5 Wochen bei hohen Cyanamidkonzentrationen häufig um etwa 10% stärker als in der H₁-Gruppe. Dieses Ergebnis ließe sich einmal so erklären, daß pentosaneabbauende Mikroorganismen vielleicht mehr in der Lage sind Cyanamid direkt zu nutzen oder aber, daß neben der biologischen Nutzung dieser N-Form vor allem bei höheren Cyanamidkonzentrationen auch eine beträchtliche chemische Umsetzung zwischen dem sehr reaktionsfähigen Cyanamid mit den Pentosanen erfolgt unter Bildung neuer Stoffe. Letztere Erklärung wird insbesondere dadurch gestützt, daß in den Kalkstickstoffgruppen tatsächlich am Ende des Versuches beträchtlich größere Mengen an Huminstoffen gebildet worden sind.

Zusammenfassung

Maisstroh wurde, nach Blättern, Stengeln und Spindeln getrennt, in Modellversuchen einer 40 Wochen langen Rotte bei Zimmertemperatur unterworfen. Dabei wurden 0—0,5—1,0—1,5% N (bezogen auf die organische Substanz) in Form von Harnstoff bzw. Kalkstickstoff zugesetzt.

In Abständen von anfangs 1 Woche, später 5 Wochen wurden Proben entnommen und auf pH, organische Substanz, direkt reduzierende Zucker, Gesamtzucker, gesamthydrolysierbare Kohlenhydrate, Cellulose und Pentosane untersucht.

Die Reaktion im Rottematerial der Blätter und Stengel erreichte schon nach 4 Tagen Werte von etwa pH 8, dagegen veränderte sich das pH der Spindeln nur langsam.

Die Maisblätter wurden aufgrund eines günstigen C/N-Verhältnisses (38) leicht und schnell zersetzt. Nach 1 Woche Rottezeit waren nur noch 75% organische Substanz, 73% hydrolysierbare Kohlenhydrate und 85% Cellulose von der jeweiligen Ausgangsmenge vorhanden; nach 5 Wochen war mehr als die Hälfte dieser Stoffgruppen einschließlich der Pentosane zersetzt. Der Abbau der Zucker vollzog sich bereits in wenigen Tagen. Bei Versuchsende waren Cellulose, Pentosane und hydrolysierbare Kohlenhydrate weitgehend aufgebraucht.

Schon geringe Mengen zugesetzten Stickstoffs genügten, um den Abbau um etwa 10 Wochen zu beschleunigen. Von den Inhaltsstoffen der Blätter wurden die Zucker sofort, Cellulose relativ leicht, die Pentosane und die hydrolysierbaren Kohlenhydrate etwas schwerer zersetzt.

Die Stengel wurden aufgrund eines weiteren C/N-Verhältnisses (76) insgesamt deutlich langsamer abgebaut; trotzdem war schon in der ersten Woche die hohe Zuckermenge im Mark der Stengel bis auf 4% der Ausgangsmenge zersetzt. Die übrigen Stoffgruppen wurden zunächst nur wenig angegriffen; nach 40 Wochen Rotte waren in der Kontrollgruppe noch 39% der organischen Substanz, 33% der hydrolysierbaren Kohlenhydrate, 44% von den Pentosanen und 48% Cellulose übrig. Abgesehen von den Zuckern wurden in den Stengeln Pentosane und Cellulose leichter, die hydrolysierbaren Kohlenhydrate etwas langsamer zersetzt. Durch N-Zusatz wurde die Rotte sehr wesentlich beschleunigt; es waren mindestens 0,5% N-Zusatz nötig, um die Verrottung in Gang zu halten.

Die Spindeln wurden nur sehr schwer zersetzt, z. T. aufgrund des weiten C/N-Verhältnisses (100), z. T. auch bedingt durch die Struktur und Verholzung des Gewebes. Von den leichtabbaubaren Zuckern abgesehen wurden in der ersten

Woche nur 2—4% der organischen Substanz bzw. der hydrolysierbaren Kohlenhydrate und Cellulose abgebaut. Nach 40 Wochen waren in der O-Gruppe immer noch 67% organische Substanz, 66% hydrolysierbare Kohlenhydrate, 61% der Pentosane und 62% der Cellulose vorhanden. Stickstoffzusatz förderte die Verrottung, doch blieben bei Versuchsende immer noch etwa 50% von den verschiedenen Stoffgruppen übrig.

Während die Zucker von den Mikroorganismen außerordentlich rasch und unabhängig von der vorhandenen N-Menge veratmet werden, hängt der Abbau von Cellulose, Pentosanen und hydrolysierbaren Kohlenhydraten weitgehend vom N-Gehalt des Materials bzw. vom N-Zusatz ab. Kalkstickstoff verlangsamt den Abbau dieser Kohlenhydratfraktionen zeitweilig; bei höheren Cyanamidmengen scheint auch eine chemische Reaktion zwischen Pentosanen und Cyanamid aufzutreten.

Diese Arbeiten wurden mit großzügiger Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft und des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten durchgeführt, wofür an dieser Stelle besonders gedankt sei.

Literaturverzeichnis

1. Amberger, A., und Wagner, A.: Stoffliche Veränderungen bei der Rotte von Maisstroh. *Landwirtsch. Forsch.* 19. Sonderheft, 3 (1965).
2. Springer, U., und Klee, J.: Feststellung der optimalen Reaktionsverhältnisse beim reduktometrischen Chromschwefelverfahren zur Schnellbestimmung von Kohlenstoff. *Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde* 71, 193 (1955).
3. Methodenbuch des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Verlag Neumann, Radebeul—Berlin, III, 39 (1951).
4. Methodenbuch des Verbandes Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Verlag Neumann, Radebeul—Berlin, IV, 16 (1953).
5. Paech, K., und Tracey, Mv.: *Moderne Methoden der Pflanzenanalyse*. Verlag Springer, Berlin—Göttingen—Heidelberg, II, 203 (1955).
6. Springer, U.: Humifizierung und Zersetzung und ihre Bestimmung in Torfen, Stallmistern und anderen organischen Bildungen. *Z. Bodenkunde u. Pflanzenernähr.* 18, 129 (1940); sowie: Zur Methodik der Stallmistuntersuchung. *Z. Bodenkunde u. Pflanzenernähr.* 12, 84 (1939).
7. —: Stoffabbau und Humusaufbau bei der Zersetzung landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich wichtiger organischer Stoffe. *Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkunde* 58, 193 (1952).
8. Nehring, K.: *Agrikulturchemische Untersuchungsmethoden für Dünge- und Futtermittel*, S. 152. Verlag Parey, Hamburg (1962).