

DYNAMIK DER STICKSTOFFMINERALISATION IM ORGANISCHEN WALDBODENMATERIAL

II. EINFLUSS DES STICKSTOFFGEHALTES AUF DIE MINERALSTICKSTOFF-NACHLIEFERUNG

von H. ZÖTTL *

Institut für Bodenkunde und Standortslehre der Forstlichen Forschungsanstalt München

Die Frage nach der Abhängigkeit der Stickstoffmineralisation vom Stickstoffgehalt des untersuchten Materials ist bereits häufig behandelt. Aus der umfassenden Darstellung von Harmsen u. Van Schreven^{8**} geht hervor, dass viele Arbeiten einen Zusammenhang zwischen C : N-Verhältnis (bzw. Stickstoffgehalt der organischen Substanz) und Mineralstickstoff-Nachlieferung erkennen lassen: Bei engem C : N-Verhältnis ist die Nachlieferung gross, bei weitem C : N-Verhältnis verringert sie sich stark. Diese Gesetzmässigkeit gilt in erster Linie für die Mineralisation von zum Boden zugegebenem organischen Material wie z.B. landwirtschaftlichen Ernterückständen oder Waldstreu (Wittich^{29 30}). Sie spielt daher bei der Kompostierung eine Rolle: Nur solange das C : N-Verhältnis im Kompost kleiner ist als 20 bis 25 (N-Gehalt über 1,5 bis 2% der org. Substanz), ist mit einer N_{\min} -Anlieferung zu rechnen; sonst wird infolge hoher Immobilisation gar kein Mineralstickstoff angeliefert. Aber auch im organischen *Bodenmaterial* besteht vielfach eine Abhängigkeit der N_{\min} -Anlieferung vom C : N-Quotienten. Sie tritt hier allerdings nicht regelmässig auf⁸, was wahrscheinlich mit der verschieden guten mikrobiellen Angreifbarkeit des untersuchten organischen Materials zusammenhängt^{8 22}.

Da mit Waldbodenmaterial erst relativ wenige Untersuchungen

* Privatdozent Dr. Heinz Zöttl, Amalienstr. 52, München 13, Deutschland.

** Da diese ausführliche Übersicht die wichtigste Literatur annähernd vollständig berücksichtigt, kann hier an Stelle von Originalzitaten auf sie verwiesen werden.

vorliegen, und teilweise uneinheitliche Ergebnisse erzielt wurden, stellten wir uns die Frage, in welchem Umfang bei organischem Bodenmaterial von verschiedenen Waldstandorten Bayerns ein Zusammenhang zwischen dem Stickstoffgehalt und der Mineralstickstoff-Nachlieferung besteht. Dabei prüften wir zunächst die Abhängigkeit der Mineralstickstoff-Nachlieferung vom C : N-Verhältnis des Materials (Abschn. 1), beobachteten den Einfluss von Mineralstickstoff-Zusatz auf das Mineralisationsgeschehen (Abschn. 2) und untersuchten schliesslich, inwieweit die mikrobielle Angreifbarkeit des organischen Materials eine Abhängigkeit der N-Mineralisation vom Stickstoffgehalt überlagert (Abschn. 3).

VERSUCHSMATERIAL UND METHODIK

Das Versuchsmaterial stammt von verschiedenartigen Waldstandorten Bayerns. Sie liegen zum grössten Teil im Bereich der staatlichen Forstämter (vergl. Abb. 1 bei Zöttl¹⁸⁶). Näheres wurde bereits in der vorhergehenden Arbeit³⁷ geschildert oder ist aus den Unterschriften der Figuren zu entnehmen.

Wir führten die folgenden Untersuchungen in Brutversuchen durch. Das hierbei angewandte Verfahren schilderten wir bereits eingehend^{35 37}. Auch bezüglich der chemischen Analysenmethoden sei auf die vorhergehende Arbeit³⁷ verwiesen.

Zeitkurve der Kohlendioxyd-Produktion

Die Messung der CO₂-Produktion nahmen wir ebenfalls nach der bereits geschilderten Methode vor.³⁷ Da sich der Verlauf der CO₂-Kurven bei Proben ohne Zusätze grundsätzlich gleich, sei nachfolgend zunächst der typische Verlauf der CO₂-Produktion während des Brutversuches geschildert und interpretiert. Wir vermeiden so spätere Wiederholungen.

In den ersten Tagen nach Versuchsbeginn steigt die CO₂-Produktion laufend an, bis sie nach etwa $\frac{1}{2}$ –2 Wochen einen Gipfel erreicht*. Sodann fallen die Kurven verschieden langsam wieder ab. Das Atmungsmaximum spiegelt wohl die unter den günstigen Brutbedingungen rasch einsetzende Verstärkung der mikrobiellen Aktivität und Vermehrung wider. Auf Grund der Ergebnisse von Woolridge³², Stevenson²⁵ und Birch² dürfen wir annehmen, dass vor allem eine gesteigerte Umsatzaktivität der neu entwickelten Mikroorganismen dieses CO₂-Maximum hervorruft. Den grössten Anteil am ersten Aufleben der Organismenätigkeit dürften die Bakterien haben. Dies geht aus parallel laufenden Bestimmungen von CO₂-Produktion

* Der Kurvenanstieg zu diesem Gipfel ist natürlich nur erkennbar, wenn man die ersten CO₂-Messungen bereits unmittelbar nach Versuchsbeginn vornimmt. Bei unseren Versuchen fällt die erste CO₂-Messung jedoch vielfach schon in die Zeit, in der das Maximum bereits erreicht ist.

und Mikroorganismenzahl in Brutversuchen von Neller²⁰, Vandecaveye²⁷, Jensen¹¹ und den Überlegungen von Zöttl³⁵ hervor.

Infolge des steigenden Verbrauches von mikrobiell leicht verfügbarem C-Material nehmen die Atmungswerte nach Erreichen eines milieubedingten Maximums wieder ab. Das Absinken der CO₂-Produktion kann allmählich und asympthotisch bis auf sehr geringe Werte erfolgen^{18 28 21}. Wie die Figuren der folgenden Abschnitte zeigen, wird dieser Kurvenabfall jedoch manchmal von einem zweiten Gipfel unterbrochen. Ein solcher Wiederanstieg ist auch bei den mit unserer Methodik durchgeführten Brutversuchen von Ehrhardt⁵ zu finden.

Vandecaveye²⁷ und Bingeman *et al.*¹ konnten nachweisen, dass in länger dauernden Brutversuchen bedeutende Fluktuationen der einzelnen Mikroorganismengruppen stattfinden. Auf das rasche Aufleben der Bakterientätigkeit folgt häufig ein zweites Maximum, das Aktinomyzeten und höhere Pilze hervorrufen. Viele unserer CO₂-Zeitkurven gleichen im Verlauf den Atmungskurven bei Vandecaveye²⁷, der zugleich die Keimzahlen der Mikroorganismen erfasste. Auch in unserem Waldhumusmaterial tritt vermutlich eine ähnliche Verschiebung in der Aktivität der einzelnen Mikroorganismengruppen ein. Diese Deutung des zweiten CO₂-Gipfels durch die im Brutversuch später relativ stärker einsetzende Pilztätigkeit erfährt durch die im Abschnitte 21 (S. 194) geschilderten Ergebnisse eine gute Stütze. Ausserdem spricht für eine solche Auslegung, dass bei Mullhumusproben mit überwiegender *bakterieller* Tätigkeit die CO₂-Werte keinen zweiten Gipfel erreichen.

ERGEBNISSE UND DISKUSSION

1 *Abhängigkeit der Mineralstickstoff-Anhäufung vom Kohlenstoff: Stickstoff-Verhältnis des Bodenmaterials.*

11 Einfluss der Brutdauer auf die Beziehung zwischen Kohlenstoff:Stickstoff-Verhältnis und Mineralstickstoff-Anhäufung.

Die Zeitkurven der N_{min}-Anhäufung* weichen in den ersten Versuchswochen vielfach mehr oder minder stark von einem linearen Anstieg ab³⁵. Deshalb sind je nach der gewählten Bebrütungsdauer verschiedene Beziehungen zwischen dem C : N-Verhältnis und der angelieferten N_{min}-Menge zu erwarten. Da nach Überwindung der Anlaufperiode (³⁷; Fig. 4 in ³⁵) fast alle unsere N_{min}-Anhäufungskurven etwa geradlinig ansteigen, schien es zweckmässig, die nach relativ kurzer Versuchsdauer angehäuften N_{min}-Mengen zur Charakterisierung heranzuziehen. Wir erfassen

* N_{min} = Mineralstickstoff (NH₄-N + NO₃-N).

dann gerade bei ungünstigem Rohhumus die geringen Werte der Anlaufzeit, in der die Mikroflora sich noch nicht an die gegenüber dem Standort wesentlich günstigeren Brutbedingungen angepasst hat. Dies ist nicht mehr der Fall, wenn man die N_{\min} -Werte nach vielen Wochen Bebrütungsdauer heranzieht. Etwaige Beziehungen können sich dann verwischen.

Wir prüften die Frage nach der geeignetsten Bebrütungsdauer an 40 Rohhumus- und Moderproben, die teilweise eine ausgeprägte Anlaufperiode der N_{\min} -Anhäufung erkennen liessen. Die folgenden Figuren 1–3 zeigen die Korrelation zwischen dem N_t -Gehalt * der organischen Substanz und der N_{\min} -Anhäufung nach 3, 6 und 15 Wochen Brutdauer. Alle N_{\min} -Werte sind in % des Gesamt-Stickstoffs der Probe ausgedrückt, da nur so ein Vergleich von Proben mit verschiedenem N_t -Gehalt möglich ist.

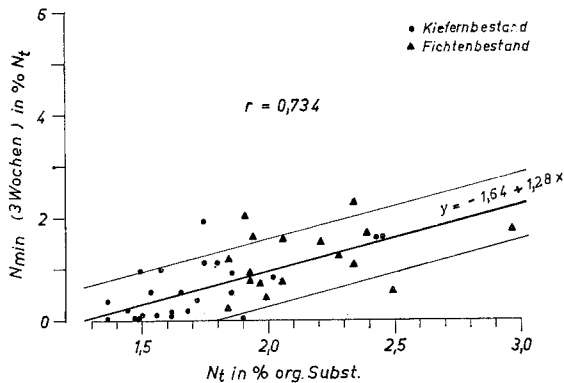


Fig. 1. Beziehung zwischen N_t -Gehalt der organ. Substanz und N_{\min} -Anhäufung nach 3 Wochen Bebrütung bei Rohhumus- und Moderproben.

Trägt man die nach 3 Wochen Bebrütung festgestellten N_{\min} -Werte auf (Fig. 1), so erhält man einen korrelativen Zusammenhang zwischen N_t -Gehalt der organischen Substanz und N_{\min} -Nachlieferung ($r = 0,734$; mit 99,99% gesichert). Mehrere Proben weisen nach dieser Versuchszeit jedoch erst N_{\min} -Spuren auf, so dass zwischen ihnen noch keine Unterschiede in der N_{\min} -Anhäufung zum Ausdruck kommen. Nach 6 Wochen Bebrütung (Fig. 2) ergibt sich ebenfalls eine signifikante Korrelation zwischen dem

* N_t = Gesamtstickstoff.

N_t -Gehalt der organischen Substanz und den N_{\min} -Werten ($r = 0,735$; mit 99,99% Grenzwahrscheinlichkeit gegenüber dem Zufallshöchstwert gesichert). Auch die nach 3 Wochen Versuchsdauer in ihren N_{\min} -Quoten noch nicht differenzierten Werte sind jetzt gut zu unterscheiden.

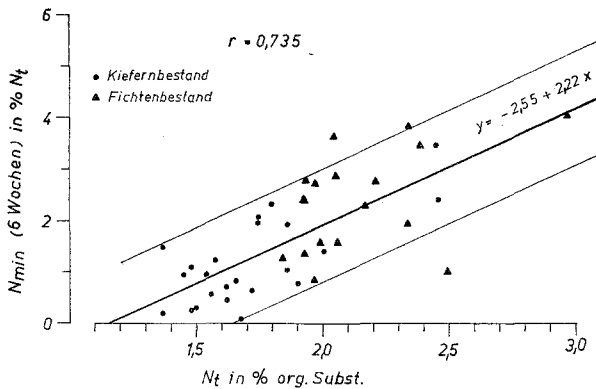


Fig. 2. Beziehung zwischen N_t -Gehalt der organ. Substanz und N_{\min} -Anhäufung nach 6 Wochen Bebrütung bei Rohhumus- und Moderproben.

Bei Wahl einer langen Versuchsdauer verschlechtert sich die Beziehung. Fig. 3 zeigt den Zusammenhang nach 15 Wochen Brutdauer. Der niedrige Korrelationskoeffizient ($r = 0,369$) ist nur noch mit 95% gesichert. Nach dieser langen Brutdauer steigen alle Zeitkurven der N_{\min} -Anhäufung etwa linear an, da nun die für Proben mit weitem C : N-Verhältnis typische Anlaufzeit überwunden ist. Jetzt herrschen im bebrüteten Material Verhältnisse, die in keiner Weise mehr den natürlichen Bedingungen entsprechen. Der pH-Wert hat sich durch den angehäuften Mineralstickstoff vom ursprünglichen Wert entfernt, die Wasserkapazität kann sich ebenfalls geändert haben. Infolge des Fehlens der Bodentiere unterbleibt ausserdem die weitere Neuaufbereitung von organischer Substanz. Der Aussagewert der N_{\min} -Zahlen nach so langer Bebrütung ist daher gering. Überdies ist der Zeitaufwand für solch langdauernde Brutversuche erheblich. Auch Kaila *et al.*¹³ kamen zu dem Ergebnis, dass die Werte nach langer Bebrütung meist schlechtere Beziehungen zum C : N-Verhältnis ergeben als etwa die nach 4 Wochen erhaltenen Zahlen.

Da die Abhängigkeit der N_{\min} -Anhäufung von der stofflichen Zusammensetzung in den ersten Wochen der Bebrütung gut zum

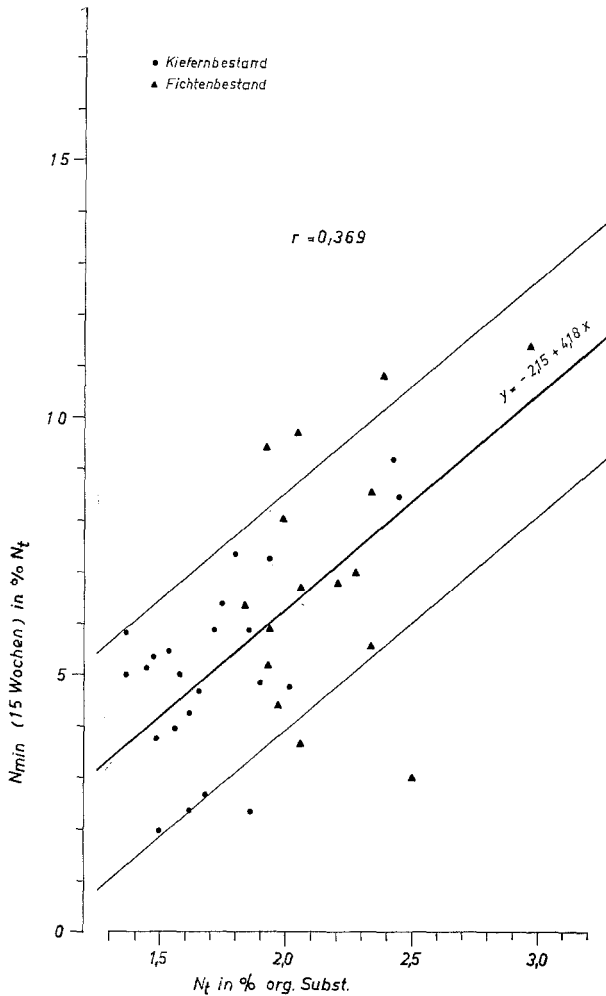


Fig. 3. Beziehung zwischen N_t -Gehalt der organ. Substanz und N_{min} -Anhäufung nach 15 Wochen Bebrütung bei Rohhumus- und Moderproben.

Ausdruck kommt, empfehlen sich zur Charakterisierung der N_{min} -Anlieferung relativ kurze Brutzeiten. Man darf sie andererseits auch nicht zu knapp wählen, um die N_{min} -Differenzen zwischen sehr N-armen Rohhumusproben noch zu erfassen. *Wir halten daher eine Brutdauer von 6 Wochen bei den von uns eingehaltenen Versuchsbedingungen zur Untersuchung von Waldbodenproben für geeignet.*

12 Beziehung zwischen Stickstoff: Kohlenstoff-Verhältnis und Mineralstickstoff-Anhäufung nach 6 Wochen Bebrütung.

Zur Prüfung des Zusammenhanges zwischen C : N-Verhältnis und N_{\min} -Anlieferung bei verschiedenen Waldhumusformen zogen wir die nach 6 Wochen Bebrütung angehäuften N_{\min} -Mengen heran. In Fig. 4 sind nun sämtliche von uns untersuchten Proben, also nicht nur die oben zur Feststellung der geeigneten Bebrütungs-dauer betrachteten Rohhumus- und Moderproben mit ihren C : N bzw. N_{\min} -Werten aufgetragen. Die N_{\min} -Zahlen stellen die Anhäufung nach 6 Wochen Bebrütung dar. Fig. 4 zeigt, dass sich die

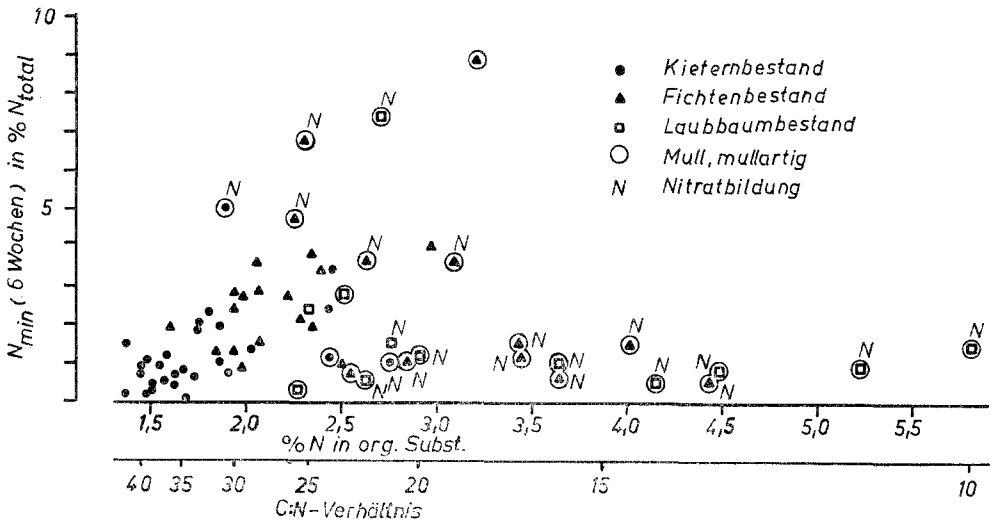


Fig. 4. Beziehung zwischen C : N-Verhältnis und N_{\min} -Anhäufung nach 6 Wochen Bebrütung bei verschiedenartigen Humusformen (Messpunkte ohne Ring: Moder und Rohhumus).

C : N-Verhältnisse der untersuchten Proben beinahe über den gesamten, im Boden vorkommenden Bereich erstrecken. Unsere stickstoffreichsten Proben (Laubwaldmull) stoßen mit C : N-Werten von 10 in den Bereich des Schwarzerdehumus (Laatsch¹⁵, S. 218) vor. Auf der anderen Seite erreichen die Rohhumusproben extrem hohe, über 40 liegende C : N-Quotienten. Noch höhere Werte findet man nur in Hochmoorböden (etwa 30 bis 70, siehe 7).

Betrachten wir die Gesamtheit der in Fig. 4 aufgeführten Punkte, so zeigt sich kein Zusammenhang zwischen dem C : N-Verhältnis

bzw. N-Gehalt der organischen Substanz und der prozentualen N_{\min} -Anhäufung nach 6-wöchiger Bebrütung. Besonders bemerkenswert ist, dass die Mehrzahl der in der organischen Substanz teilweise enorm N-reichen Mullproben nach 6 Wochen Brutdauer ebenso wie zahlreiche N-arme Rohhumusproben nur bis zu 2% des N_t -Vorrats als N_{\min} anhäufen. *Es ist also kein durchgehender Unterschied in der Höhe des N_{\min} -Prozentsatzes zwischen Mull- und Rohhumusproben zu erkennen* (vgl. jedoch ³⁶). Fig. 4 verdeutlicht ferner, dass der organische Stickstoff im Mull und in mullartigen Humusformen fast durchweg nitrifiziert wird (Zeichen N beim Messpunkt), während in Rohhumusproben nur Ammonifikation abläuft. Dass ausserdem die untersuchten Proben von Laubwaldstandorten ziemlich ausschliesslich zur Humusform Mull bis mullartiger Moder gehören, überrascht nicht, da in Bayern die Bildung von Rohhumus bevorzugt an Nadelbaumbestände gebunden ist.

Eliminiert man aus den in Fig. 4 enthaltenen Werten alle Mullhumusproben sowie die Proben aus mullartigen Moderlagen, in denen die Streu rasch in die F-Lage und den humusreichen A_1 -Horizont eingearbeitet wird (Signaturen *mit Kreis* in Fig. 4), so verbleiben lediglich die Proben, die wir bereits oben zur Besprechung der zweckmässigsten Bebrütungsdauer (Fig. 1-3) herangezogen haben. Alle diese Proben gehören zu den Humusformen Rohhumus, moderartiger Rohhumus, rohhumusartiger Moder und Moder. Für dieses Material besteht, wenn wir nochmals Fig. 2 mit Fig. 4 vergleichen, eine deutliche Korrelation zwischen dem N-Gehalt der organischen Substanz (C : N-Verhältnis) und der N_{\min} -Anhäufung.

Im Rohhumus und Moder (alle Proben sind unter Ausschluss frischer Streu gezogen) *ist der als Mineralstickstoff angehäuften N-Prozentsatz also umso grösser, je enger das C : N-Verhältnis ist* oder mit anderen Worten, je höher der N_t -Gehalt der organischen Substanz liegt. Es wird nicht nur eine dem höheren N-Gehalt der organischen Substanz entsprechend grössere N_{\min} -Menge gebildet, sondern eine noch darüber hinaus gehende Steigerung der Mineralstickstoff-Nachlieferung bewirkt.

Die untersuchten Mullproben häufen entweder relativ hohe oder nur geringe N_{\min} -Mengen an. Auffällig sind vor allem die wenigen Mullproben, deren N_{\min} -Nachlieferung weit über den Werten der Moder- und Rohhumusproben liegt. Eine Prüfung der Humusform

ergab, dass die Proben der Mullgruppe mit hohem N_{\min} -Prozentsatz durchweg moderartigen Mull darstellen, in dem bei der Probenahme die sonst einheitlich unberücksichtigte obere Streulage nur schlecht vollständig zu entfernen war. Diese Proben enthalten daher einen gewissen Anteil erst schwach zersetzten Streumaterials. Es weist noch viele leicht angreifbare, N-haltige Stoffe auf, weshalb sich hier die N_{\min} -Anhäufung im Gegensatz zu reinem Mullhumus des A_1 -Horizonts erhöht*.

Innerhalb der Mullproben von Fig. 4 mit geringer N_{\min} -Anhäufung ist keine Korrelation der N_{\min} -Werte zum C : N-Verhältnis ersichtlich. Alle diese Proben bestehen zweifellos zum grossen Teil aus echten und sehr stabilen Humusstoffen und unterliegen daher nur schwer und langsam der Mineralisation („Dauerhumus“, Scheffer u. Schachtschabel²², S. 72).

Welch grosser Unterschied in der chemischen Zusammensetzung der organischen Substanz solcher Proben und von Material aus Rohhumuslagen besteht, geht u.a. aus der Untersuchung von Springer u. Klee²⁴ hervor, deren Untersuchungsmaterial mit den von uns auf ihre N-Mineralisation untersuchten Proben teilweise identisch ist. Vor allem ist der Anteil des leichter mineralisierbaren Amino-N am Gesamt-N bei Mullhumus bedeutend geringer als im Rohhumus oder Moder, wo er häufig über 50% beträgt^{31 24}. Die geringen N_{\min} -Quoten der Mullproben sind also verständlich.

Man könnte auch für die Mullproben eine Beziehung zwischen C : N-Quotient und N_{\min} -Prozentsatz erwarten. Sehr wahrscheinlich ist das vorliegende Material aber trotz grober, humusmorphologisch gleicher Einstufung in Bezug auf seine mikrobielle Angreifbarkeit doch ziemlich verschieden. Die Proben mit relativ niedrigem N-Gehalt dürften erst in geringem Umfang echte Huminstoffe in Ton-Humus-Koppelung aufweisen. Je N-reicher die organische Substanz solcher Proben wird, desto höher ist vermutlich ihr Gehalt an stabilen Humusstoffen und desto geringer ihr mikrobiell leicht zersetzbarer Anteil. Diese Gegenläufigkeit von N-Gehalt der organischen Substanz und mikrobieller Angreifbarkeit überdeckt offenbar die Abhängigkeit der N_{\min} -Quote vom C : N-Verhältnis.

* Auf Standorten mit Mullzustand zersetzt sich die fallende Streu i.d.R. binnen eines Jahres. Eine Abtrennung aufliegender Streu war hier bei der Probenahme stets gut möglich.

Die geschilderten Ergebnisse machen klar, dass bei Betrachtung verschiedener Humusformen mit uneinheitlicher mikrobieller Angreifbarkeit keine Beziehung zwischen C : N-Verhältnis und N_{\min} -Anlieferung aufscheinen kann. Nur beim Vergleich von N-haltigen organischen Substanzen mit ähnlicher mikrobieller Verwertbarkeit lässt sich der Einfluss des C : N-Quotienten auf die Mineralisation erkennen.

Zu Beginn dieses Abschnitts erörterten wir an Hand der Literatur die Abhängigkeit der N_{\min} -Anhäufung vom C : N-Verhältnis des Materials. Die dort genannten Zahlen gelten jedoch nur für leicht zersetzbare organische Substanzen. Aus den Ergebnissen unserer Brutversuche geht hervor, dass keine Übertragung dieser in der Landwirtschaft gebräuchlichen Grenzwerte (bei C : N-Quotienten über 20 bis 25 keine N_{\min} -Anlieferung) auf die Verhältnisse der Waldstandorte möglich ist. Nach landwirtschaftlichen Vorstellungen wäre eine N_{\min} -Anhäufung in Rohhumus mit C : N-Werten über 40 undenkbar. Sie kann in unseren Waldbodenproben nur ablaufen, weil der grösste Teil der organischen Substanz im Rohhumus mikrobiell äusserst schwer angreifbar (hoher Ligningehalt usf.!) und daher praktisch ohne Einfluss auf das Mineralisationsgeschehen ist.

Die von uns untersuchten Moder- und Rohhumusproben oder die mullartigen Humusformen mit gewissem Streuteil stellen jeweils eine Gruppe dar, in der die mikrobielle Angreifbarkeit näherungsweise einheitlich ist. Nur für solche Probengruppen ist eine Beziehung zwischen C : N-Verhältnis und N_{\min} -Anhäufung erkennbar.

2 Wirkung von Mineralstickstoff-Zusatz auf die Stickstoffmineralisation im organischen Bodenmaterial.

Wir sahen oben, dass der N_t -Gehalt der organischen Substanz die N_{\min} -Nachlieferung in Waldbodenproben stark beeinflusst. Hat nun auch die Zugabe von Mineralstickstoff eine Wirkung auf das Mineralisationsgeschehen?

Es ist denkbar, dass eine N_{\min} -Gabe während des Brutversuchs (wenn schon steigende N_{\min} -Anhäufung erfolgt) anders wirkt als wenn man N_{\min} bereits zu Beginn der Bebrütung (während der Anlaufperiode) anbietet. Befassen wir uns zunächst mit der Erhöhung des N_{\min} -Gehalts durch Zugabe während der Bebrütung.

Hesselman⁹, Duchaufour *et al.*⁴, Stojanovic u. Broadbent²⁶ und Van Schreven²³ zeigten in solchen Versuchen mit verschiedenartigem Bodenmaterial übereinstimmend, dass N_{min} -Zusätze während der bereits laufenden N_{min} -Anhäufung keine Wirkung auf die N-Mineralisation haben. Eigene Versuche brachten das gleiche Ergebnis. Dies ist erklärlich: Im bereits längere Zeit laufenden Brutversuch mit steigender N_{min} -Anhäufung ist Stickstoff kein begrenzender Faktor für die mikrobielle Tätigkeit. In diesem Stadium der Mineralisation ist die Mikroorganismenaktivität vielmehr durch Mangel an angreifbaren C-Quellen beschränkt. Erst bei einer Erhöhung dieses Angebots können die Mikroorganismen die angehäuften oder zugesetzten N_{min} -Mengen verwerten. Eine bloße Zugabe von N_{min} muss daher ohne Wirkung bleiben.

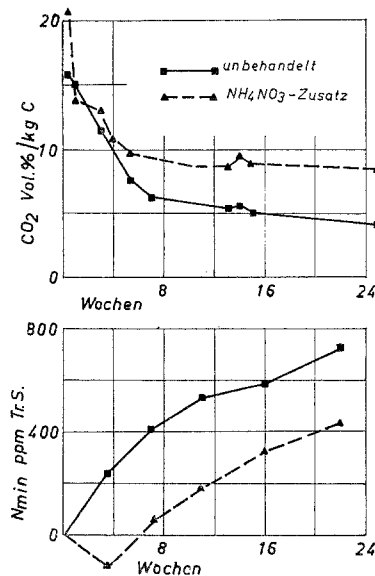


Fig. 5. N_{min} -Anhäufung und CO_2 -Produktion von Mull „Ottobeuren“ (pH = 3,4; C : N = 20,1). Gestrichelt: Zusatz von je 650 ppm NH_4 -N und NO_3 -N (zugegebener N_{min} -Betrag in der Kurvendarstellung abgezogen).

Gibt man N_{min} bereits bei Beginn der Bebrütung zu, so liegen die Verhältnisse anders. In diesem Fall ist zunächst eine gewisse Immobilisation des zugesetzten N_{min} zu beobachten (vergl. z.B. 19). Im späteren Verlauf geht die N_{min} -Anhäufung dann ähnlich wie in den unbehandelten Vergleichsproben vor sich. Auch von uns

ausgeführte Versuche zeigten die gleiche Erscheinung (Fig. 5). Dieses Ergebnis ist im Einklang mit dem oben Geäußerten gut zu deuten. *Der schon zu Beginn des Brutversuchs zugesetzte Mineralstickstoff unterliegt teilweise dem sofortigen Verbrauch durch die jetzt in starker Entwicklung begriffene Mikroflora.* Ihr steht nämlich zu diesem Zeitpunkt noch viel verwertbares Kohlenstoffmaterial, aber nur wenig Stickstoff zur Verfügung.

21 Wirkung von Nitratzugabe auf die Stickstoffmineralisation in nicht nitrifizierenden Rohhumus- und Moderproben.

In unseren Modellversuchen zeigten sich bei Zusatz von NH_4 - und NO_3 -N zu nicht nitrifizierendem Rohhumus und Moder Wirkungen, die von dem im vorhergehend Geschilderten abweichen. Wie aus Fig. 6 hervorgeht, sinken die CO_2 -Werte in solchen Proben nach Zugabe von Ammoniumnitrat tief unter die Kurve des Vergleichsmaterials ab. Die zugesetzte NO_3 -N-Menge bleibt den ganzen Versuch hindurch erhalten (vgl. auch Fig. 3 in ³⁴). Die NH_4 -N-Kurve steigt in ähnlicher Weise an wie bei der Vergleichsprobe.

Da durch Ammoniumsalze (ohne Nitrat) niemals eine solche starke Erniedrigung der CO_2 -Produktion erzielt wurde, kann diese Wirkung nur eine Folge des NO_3 -N sein. Welcher Art ist nun diese Beeinflussung? Der pH-Wert ändert sich durch diese Stickstoffsalzgabe nicht. Eine Beeinträchtigung der mikrobiellen Tätigkeit infolge zu starker Salzkonzentration ist bei den gegebenen Mengen ebenfalls nicht anzunehmen, denn in langdauernden Brutversuchen stellt man in nicht nitrifizierenden Rohhumusproben noch wesentlich höhere N_{min} -Gehalte (weit über 1000 ppm) fest, ohne dass ein Einfluss auf das Mineralisationsgeschehen erkennbar ist (vgl. ³³ oder ¹⁸). Es muss sich also um eine Giftwirkung des NO_3 -N auf spezifische Rohhumusbewohner handeln. Sie kann jedoch nur einen Teil der Mikroorganismen betreffen, da zwar die CO_2 -Produktion, nicht aber die Anhäufung von NH_4 -N beeinträchtigt wurde.

Zur weiteren Prüfung des Nitratinflusses führten wir einen Versuch mit steigenden NO_3 -N-Gaben durch. Als Versuchsmaterial diente ein ebenfalls nicht nitrifizierender, moderartiger Rohhumus (Fig. 7). Die gewählten Salzmengen, die wir auch hier als wässrige

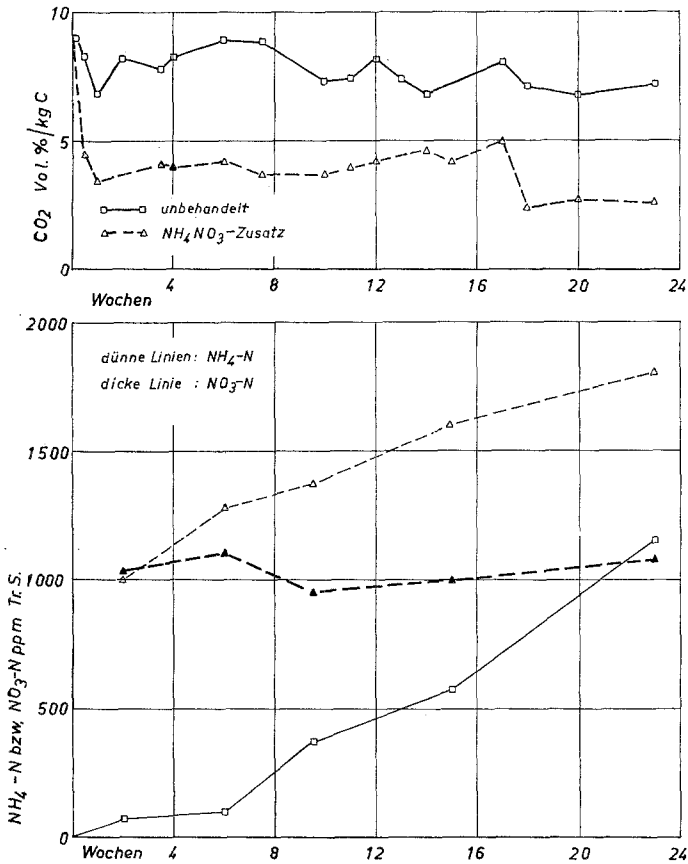


Fig. 6. N_{\min} -Anhäufung und CO_2 -Produktion von Rohhumus „Amberg“ (pH = 2,76; C : N = 30,5) ohne und mit Zusatz von je 1000 ppm NH_4 -N und NO_3 -N (als NH_4NO_3).

Lösung zumischen, gehen aus der Legende zu Fig. 7 hervor. Teilweise setzten wir gleich hohe NH_4 -N- und NO_3 -N-Mengen in Form von Ammonitrat und als K- bzw. P-Salze * an,

Das Ergebnis ist eine deutliche Staffelung der CO_2 -Kurven in Abhängigkeit von der Höhe der NO_3 -Gaben (Fig. 7). Je grösser die NO_3 -Mengen sind, umso stärker wird die CO_2 -Produktion gehemmt. Dabei spielt es keine Rolle, ob NO_3 -N allein oder in Verbindung

* Die K- und Phosphationen blieben offenbar ohne Einfluss auf das Mineralisationsgeschehen.

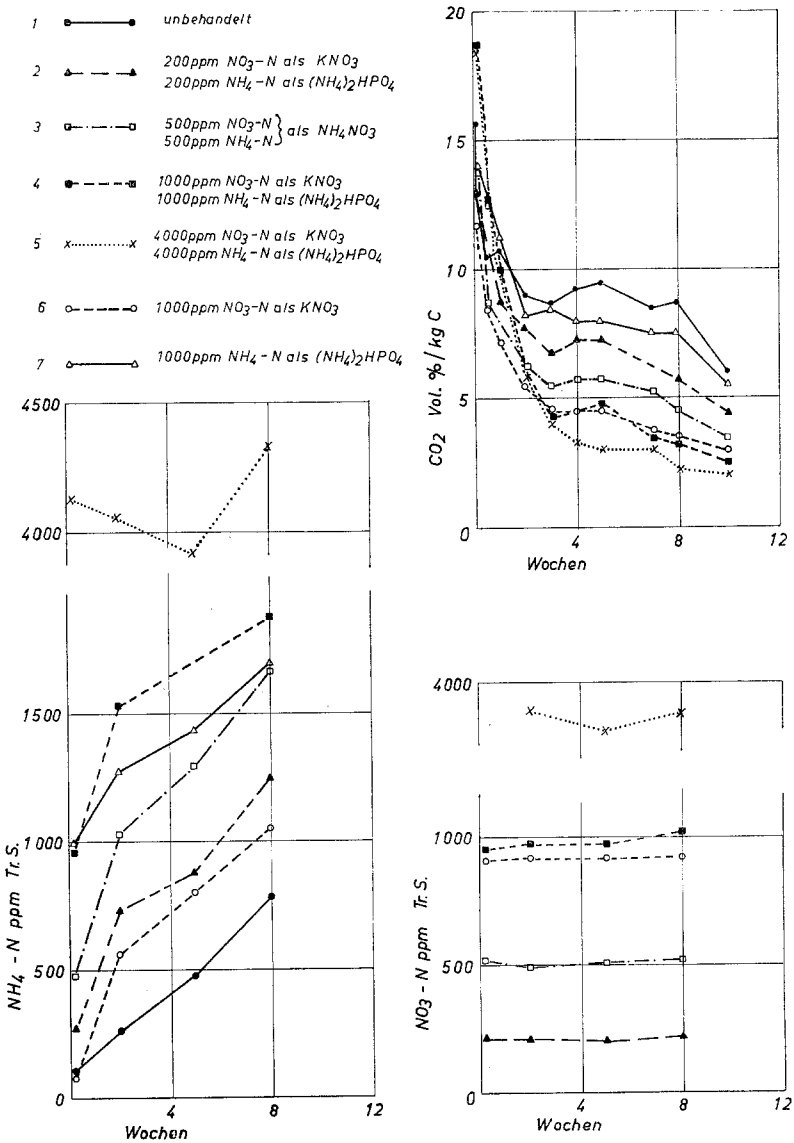


Fig. 7. NH₄-N-Anhäufung, NO₃-N-Gehalt und CO₂-Produktion bei der Bebrütung von Rohhumus „München-Süd“ (pH = 2,95; C : N = 25,7) nach Zusatz gestaffelter NO₃-N- bzw. NH₄-N-Gaben.

mit $\text{NH}_4\text{-N}$ gegeben wurde (ähnliche Kurven der Versuchsglieder 4 und 6 in Fig. 7!). Die gegebenen Nitratmengen wurden erstmals am Tag nach dem Zusatz bestimmt (Ausgangswerte in Fig. 7). Sie finden sich den Versuch hindurch mit nur geringer Streuung stets in der gleichen Höhe wieder. Die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anhäufung geht in allen Versuchsgliedern unvermindert weiter, wobei die mit $\text{NO}_3\text{-N}$ behandelten Proben sogar einen steileren Anstieg der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Kurven zeigen als die Serien ohne Nitratzusatz. Dadurch haben die Versuchsglieder 2, 3, 4 und 6 (mit $\text{NO}_3\text{-Zusatz}$) * nach 2 bzw. 5 Wochen Bebrütung im Durchschnitt bereits 410 bzw. 720 ppm $\text{NH}_4\text{-N}$ angehäuft, während die Versuchsglieder 1 und 7 (ohne $\text{NO}_3\text{-Zusatz}$) nur 220 bzw. 515 ppm $\text{NH}_4\text{-N}$ enthalten.

Auch bei anderen, nicht nitrifizierenden Rohhumusproben, die wir untersuchten, beeinflussten Nitratgaben die CO_2 -Produktion und $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anhäufung in gleicher Weise. Die in Fig. 7 dargestellten Ergebnisse lassen sich daher in gewissem Umfang verallgemeinern: *Bei nicht nitrifizierenden Rohhumusproben erniedrigt Nitratzusatz die CO_2 -Produktion und erhöht die $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anhäufung.*

Wir deuten diesen „Nitrat-Effekt“ als Giftwirkung auf einen Teil der Mikroorganismen. Da die $\text{NO}_3\text{-N}$ -Mengen während der Versuchsdauer in gleicher Höhe nachweisbar bleiben, muss die Schädigung der Mikroorganismen ohne merkliche Aufnahme von NO_3 eintreten. Möglicherweise kommt die Wirkung durch in Spuren gebildetes Nitrit zustande. Es ist aber auch folgende Erklärung möglich: Durch wasserlösliche, stark reduzierende organische Stoffe wird im Rohhumus ein niedriges Redoxpotential erzeugt. Die Mikroflora des Rohhumus ist daran angepasst. Gibt man nun Nitrat hinzu, so erhöht sich der rH-Wert entsprechend, was eine Reihe von Mikroorganismen nicht vertragen. In nitrifizierenden Mullproben herrschen von vorneherein höhere rH-Werte; die hier lebende Mikrobenpopulation ist durch Nitratgaben daher nicht zu schädigen.

Die NO_3 -Wirkung setzt (siehe CO_2 -Kurve in Fig. 6) unmittelbar nach Beginn der Bebrütung noch nicht ein. Wie weiter oben ge-

* Die mit je 4000 ppm $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{NO}_3\text{-N}$ versetzten Proben (Versuchsglied 5) zeigen die stärkste CO_2 -Hemmung und keine vermehrte $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anhäufung. Durch solch übermäßig hohe Gaben, die auch im lange bebrüteten Humus nicht erreicht werden, ist offenbar eine gewisse Schockwirkung eingetreten. Dieses Versuchsglied ist deshalb in diesen Zahlen nicht berücksichtigt.

schildert, dürfen wir in unseren Rohhumusproben in dieser ersten Zeit vor allem rege Bakterientätigkeit annehmen. Sie erfährt durch Nitrat offenbar keine merkbare Hemmung. Erst mit dem Aufleben der Pilzaktivität (Anstieg zum 2. Gipfel der CO_2 -Kurve) zeigt sich der Nitrat-Effekt deutlich. Teilweise ist in den CO_2 -Kurven bei Nitratzusatz gar kein zweiter Gipfel mehr zu erkennen. Dieses Verhalten legt die Vermutung nahe, dass $\text{NO}_3\text{-N}$ in erster Linie auf die Pilzflora des Rohhumus schädigend wirkt. Die verstärkte $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anhäufung in den nitratbeeinflussten Proben kann man ebenfalls durch eine relative Unterdrückung der Pilztätigkeit bei gleichzeitig ungehemmter Bakterienaktivität erklären: Eine vorwiegend von Bakterien ohne Konkurrenz der Pilze getragene N-Mineralisation führt schon bei relativ geringem Bruttoumsatz zu hoher N_{min} -Anhäufung, da der „ökonomische Koeffizient“* bei Bakterien nach Mikola¹⁷ höchstens 10% beträgt. Pilze arbeiten hingegen mit einem wesentlich höheren Koeffizienten von 20 bis 30% des Trockensubstanzverlustes. Sie verbrauchen also bei der Mineralisation einer bestimmten Menge N-haltiger organischer Substanz mehr Stickstoff zum Aufbau eigener Körpersubstanz als die Bakterien. Dadurch verringert sich die Mineralstickstoff-Nachlieferung entsprechend. Wird nun – wie wir für unsere Versuche annehmen – die Lebenstätigkeit der Pilze gehemmt, so überwiegt die Mineralisationsarbeit der Bakteriengruppen. Infolge ihrer geringeren Immobilisationsquote erfolgt eine höhere N_{min} -Anlieferung.

Die Mikrobiologie der Käse- und Gärungstechnik liefert ebenfalls Anhaltspunkte für unsere Annahme. So wird im Käsebetrieb Nitrat zugesetzt, um unerwünschte Gasbildung durch anaerobe Bakterien oder Fremdinfectionen von Pilzen zu verhindern. Jörgensen u. Hansen¹² erwähnen die Giftwirkung von Nitrat auf Brauereihefe. Die Hemmwirkung tritt hier schon bei geringeren Nitratkonzentrationen auf als die Bodenlösung in unseren Brutversuchen enthält. Mit der Schädigung der Hefe setzt dann steigende Bakterieninfection ein.

Wir dürfen somit sagen: *Ein Teil der im Rohhumus lebenden Mikroorganismen wird durch Nitrat gehemmt. Die beobachtete Steigerung der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Anhäufung könnte auf eine stärkere Schädigung der Pilzflora zurückzuführen sein.* Andererseits wäre durch die

* Der „ökonomische Koeffizient“ drückt die beim Abbau organischer Substanz wieder immobilisierte Menge in Prozent des Trockensubstanzverlustes aus.

Giftwirkung des Nitrats aber auch eine Teilsterilisation mit anschließender Autolyse denkbar. In Humusformen mit Nitrifikation ist kein „Nitrat-Effekt“ zu erwarten*, da in solchem Material die Tätigkeit der Bakterien überwiegt und die vorkommenden Pilzgruppen an das laufend gebildete Nitrat bzw. hohe rH-Werte angepasst sind.

Wie die in Fig. 6 bei Zöttl³⁷ dargestellten Ergebnisse zeigen, tritt der „Nitrat-Effekt“ bei extremer biologischer N-Sperre offenbar nicht mehr auf. In solchen Fällen (wir fanden das gleiche Ergebnis auch in weiteren unveröffentlichten Versuchen, bei denen wir in nicht nitrifizierenden Proben durch Saccharose-Zusatz eine N-Sperre hervorriefen) ist keine Hemmwirkung des Nitrats erkennbar, hingegen aber deutlich seine Immobilisation.

3 Bedeutung von Huminstoffgehalt und Kohlenstoff: Stickstoff-Verhältnis des Bodenmaterials für die Stickstoffmineralisation.

In den vorhergehenden Abschnitten sahen wir, dass die mikrobielle Angreifbarkeit des organischen Bodenmaterials und ihr N-Gehalt die Mineralstickstoff-Anhäufung stark beeinflussen. Wir erhielten Hinweise, dass die mikrobielle Verwertbarkeit der organischen Substanz bedeutsamer für die N_{\min} -Anlieferung ist als ihr N-Gehalt. Dies zeigte uns vor allem auch die Betrachtung der Beziehung zwischen C : N-Verhältnis und Mineralisationsquote bei verschiedenen Humusformen. Dabei ergaben sich für Proben mit geringem Anteil schwach zersetzten Pflanzenmaterials und hohem Gehalt stabiler Huminstoffe (= Mullhumus) trotz engem C : N-Verhältnis nur sehr geringe Werte der N_{\min} -Anlieferung. Diese Proben unterscheiden sich jedoch nicht nur durch geringere mikrobielle Angreifbarkeit, sondern auch noch hinsichtlich vieler anderer massgebender Eigenschaften von Moder- oder Rohhumusproben. Wir versuchten daher die Frage nach der Prävalenz des Faktors „mikrobielle Zersetzbarkeit“ oder des Faktors „C : N-Verhältnis“ durch Untersuchungen am gleichen Humusmaterial bzw. an Humuslagen des gleichen Standorts zu klären.

Zwei Wege wurden beschritten. Einmal prüften wir verschiedene Siebfraktionen des gleichen Rohhumusmaterials auf ihre N-Mineralisation. Es war zu erwarten, dass sich in den feiner gesiebten

* Dies bestätigen unveröffentlichte Versuche.

Proben Humusstoffe und schwerer angreifbare Gewebestandteile anreichern. Diese Fraktionen müssten ein engeres C : N-Verhältnis als die gröberen Anteile aufweisen. Zum anderen entnahmen wir auf einigen Standorten die einzelnen Lagen von Rohhumus (und Moder) getrennt zur Bebrütung. In den oberen Lagen, vor allem in der L-Lage, befinden sich noch viele und leicht verwertbare pflanzliche Gewebestücke mit hohem C : N-Verhältnis, während in den tieferen Lagen (vor allem im A₁-Horizont) stabile Humusstoffe mit niedrigerem C : N-Quotienten angereichert sind. Sowohl in den verschiedenen Siebfraktionen als auch in den einzelnen Lagen des Humushorizonts liegt ein relativ einheitliches Material vor, denn auch die verschiedenen Humuslagen sind ja grossenteils aus der gleichen Streu hervorgegangen. Dieses Versuchsmaterial unterscheidet sich hauptsächlich durch die Gegenläufigkeit von C : N-Verhältnis und Prozentsatz leicht angreifbarer organischer Substanzen.

Wir gaben eine Reihe naturfeuchter Moder- und Rohhumusproben durch Siebe verschiedener Maschenweite (1 bis 7 mm). Trotz deutlicher morphologischer Unterschiede in der Zusammensetzung der Fraktionen waren ihre C : N-Zahlen jedoch annähernd gleich. Auch der Mineralisationsablauf im Brutversuch differierte kaum. Die Untersuchung der Siebfraktionen ergibt daher keine Antwort auf unsere Frage.

Hingegen unterschieden sich die einzelnen Humuslagen der von uns untersuchten Moder- und Rohhumusproben deutlich im C : N-Verhältnis und Gehalt an Huminstoffen. Wie aus der Legende von Fig. 8 und 9, in denen die Ergebnisse zweier Versuche als Beispiele dargestellt sind, hervorgeht, nimmt der C : N-Quotient von der L-Lage über F- und H-Lage zum Humus des A₁-Horizontes deutlich ab. Die Anreicherung stabiler Humusstoffe dürfte hingegen in der Streu (L-Lage) am geringsten, im A₁-Horizont am grössten sein. Dies zeigen die Analysenwerte von „Podsol Amberg“ bei Springer u. Klee²⁴, die am gleichen Material gewonnen wurden, wie es im Brutversuch „Rohhumus Amberg“, Fig. 8, Verwendung fand.

Beim Kiefern-Rohhumus „Amberg“ (Fig. 8) und im Fichten-Rohhumus „Sachsenried“ (Fig. 9) zeigen CO₂-Produktion und N_{min}-Anhäufung eine übereinstimmende deutliche Staffelung entsprechend den einzelnen Humuslagen. *CO₂- und N_{min}-Werte liegen um so tiefer, je stärker die Lagen zersetzt und mit stabilen Humus-*

stoffen angereichert sind – trotzdem das C : N-Verhältnis in diesen tieferen Humuslagen bedeutend enger ist. Es überrascht, dass trotz des erwarteten hohen Bruttoumsatzes in der schwach zersetzten und mikrobiell leicht angreifbaren Streu (F-Lage) auch die höchste N_{\min} -Anhäufung festzustellen ist. Die stabilen Huminstoffe der

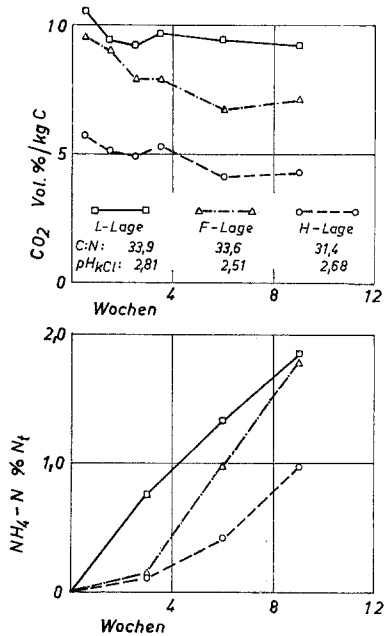


Fig. 8. N_{\min} -Anhäufung und CO_2 -Produktion von L-, F- und H-Lage des Rohhumus „Amberg“.

H-Lage und des an kolloidalem Humus reichen A_1 -Horizonts verhalten sich wie Mullhumusformen: Ungeachtet des höheren N_t -Anteils in der organischen Substanz liefern sie die geringsten N_{\min} -Werte. Die schlechte mikrobielle Angreifbarkeit ist wohl die Ursache hierfür.

Diese Ergebnisse decken sich mit Befunden von Krauss u. Prescher¹⁴, die an Hand von CO_2 -Messungen ebenfalls eine Abnahme der Mineralisationsintensität von der L- zur H-Lage feststellten. Duchaufour³ erhielt für die N_{\min} -Anlieferung der einzelnen Humuslagen des gleichen Standorts mit unseren Resultaten übereinstimmende Tendenzen. Leider hatten die genannten Verfasser jeweils nur die N_{\min} -Anhäufung oder die Brutto-Minera-

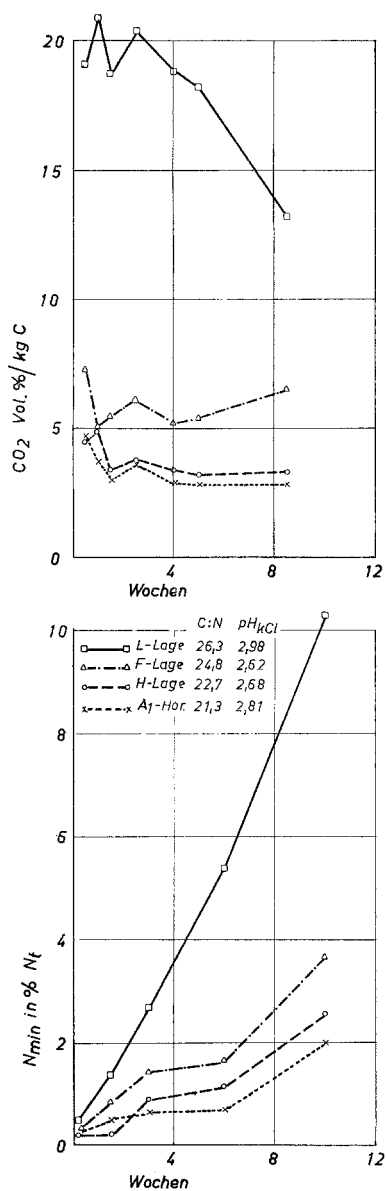


Fig. 9. N_{min}-Anhäufung und CO₂-Produktion der Humuslagen des moderartigen Rohhumus „Sachsenried“.

lisation allein gemessen und nicht, wie wir, beide Größen am gleichen Material untersucht.

Ein abweichendes Verhalten schildert Fenton ⁶. Er verglich in Brutversuchen mit Perkolationstechnik ¹⁶ die Netto-Mineralisation von gemahlener Birken- und Kiefernstreu allein und in Mischung mit Mullboden. Die eigemischte Kiefernstreu drückte dabei die N_{\min} -Anhäufung im Mullboden stark herab, was auf hohe Brutto-Mineralisation bei geringer Netto-Anlieferung schliessen lässt. Im Gegensatz zu unseren Versuchen arbeitete Fenton mit *frischer* Streu, die einen hohen Anteil leicht verwertbarer organischer Substanzen enthalten dürfte. Unsere L-Lagen-Proben umfassen hingegen nur Streu, die älter als 1 Jahr ist. Zudem wurden sie nicht gemahlen. Die Daten Fentons machen jedenfalls wahrscheinlich, dass die frisch gefallene Streu zunächst keine gute N_{\min} -Quelle darstellt.

Weitere, von uns mit Laubwald-Moderlagen durchgeführte Brutversuche zeigten ebenfalls die gleiche Staffelung der Werte, wie wir sie oben für Rohhumusproben schilderten. *Alle Brutversuche mit Material der einzelnen Humuslagen ergeben somit übereinstimmend, dass der Faktor „mikrobielle Angreifbarkeit“ die Bedeutung des C : N-Verhältnisses für die Anhäufung von N_{\min} überlagert* *. Dies steht in Einklang mit den früher geschilderten Untersuchungen über die Abhängigkeit der N_{\min} -Anhäufung von der Menge verfügbaren N-freien C-Materials ³⁷ und deckt sich mit den an Ackerböden unter Verwendung von N^{15} -Technik erzielten Ergebnissen von Jansson ¹⁰.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Einfluß des Stickstoffgehaltes auf die Mineralstickstoff-Nachlieferung wird in Laborbrutversuchen mit Waldhumusmaterial geprüft. Es zeigt sich eine gewisse Abhängigkeit der Mineralstickstoff-Nachlieferung vom Gesamtstickstoffgehalt des organischen Materials (C : N-Verhältnis).

Der Faktor „mikrobielle Zersetzbarkeit“ überlagert jedoch diese Beziehung. Daher kann man aus dem C : N-Verhältnis keine allgemein gültigen Schlüsse auf die Mineralstickstoff-Nachlieferung ziehen. Nur beim Vergleich von Material mit ähnlicher mikrobieller Zersetzbarkeit besteht eine enge Abhängigkeit zwischen den beiden Größen. Eine solche Beziehung ist für die

* Allerdings darf nicht unberücksichtigt bleiben, dass die pH-Werte in den weniger abgebauten Humuslagen meist etwas höher liegen und auch aus diesem Grunde eine bessere Mineralisation erfolgen kann (vgl. Zöttl ³⁸).

untersuchten Rohhumus- und Moderproben zu erkennen. Bei diesem Humusmaterial liegt die Mineralisationsquote um so höher, je enger das C : N-Verhältnis ist. Die Korrelation ist nach 6 Wochen Brutversuch besser als nach 3 oder 15 Wochen.

Für Mullhumus und für Humus aus der Humusstofflage sowie dem A₁-Horizont von Bodenprofilen mit organischer Auflage ergeben sich trotz engem C : N-Verhältnis meist nur sehr geringe Mineralisationsquoten. Die Zahlen liegen ähnlich niedrig wie bei ungünstigen Rohhumusformen mit weitem C : N-Verhältnis. Ursache hierfür dürfte der hohe Gehalt dieser Humusformen an stabilen Huminstoffen sein. Proben aus der F-Lage von Moder haben hingegen häufig hohe Mineralisationsquoten. Die höchsten Werte von Brutto- und Nettomineralisation treten bei Material aus der Streulage auf.

Mineralstickstoff-Zusätze während der Bebrütung bleiben ohne Einfluß auf den Mineralisationsablauf – außer man gibt Nitrat zu nicht nitrifizierenden Rohhumus-Proben. In diesem Fall ist eine Hemmwirkung auf einen Teil der Mikroflora zu beobachten. Die Kohlendioxyd-Produktion sinkt, die Mineralstickstoff-Anhäufung ist jedoch erhöht. Zu Beginn der Bebrütung zugegebener Mineralstickstoff unterliegt der Immobilisation.

SUMMARY

The influence of the nitrogen content on the mineral-nitrogen supply was investigated in laboratory incubation studies with humus material of forests. It shows a certain dependence of the mineral-nitrogen supply on the total nitrogen content of the organic matter (C : N ratio).

However, the factor "microbial decomposability" directly influences this correlation. Therefore one cannot draw generally valid conclusions of the mineral-nitrogen supply from the C : N ratio. Only when comparing material with similar microbial decomposability is there a close correlation between both the quantities. Such a relation is seen for the raw-humus and moss-humus samples which were tested. In this humus material the higher the mineralization rate the lower is the C : N ratio. The correlation after 6 weeks incubation is closer than after 3 or 15 weeks.

Mull humus, and also humus from the H-layer and from the A₁-horizon of raw-humus profiles generally show very low mineralization rates in spite of their low C : N ratio. These mineralization rates are mostly as low as the rates for poor raw-humus samples with high C : N ratio. The cause is the high content of stable humin substances. In contrast samples from the F-layer of moss humus often have high mineralization rates. The highest values of gross- and net-mineralization appear in material from the L-layer.

Addition of mineral-nitrogen during the incubation has no influence on the mineralization of organic nitrogen – except for the addition of nitrate to non-nitrifying raw-humus samples. In this case a check effect upon a part of the microflora is observed. The CO₂ production decreases, but the mineral-nitrogen accumulation increases. At the beginning of incubation, added mineral-nitrogen is immobilized.

Verf. dankt Herrn Professor Dr. W. Laatsch für Anregungen und stete Förderung der Arbeit, Fräulein I. Schild für die Ausführung der chemischen Analysen und Fräulein K. Zellner für die Aufbereitung der Proben.

Eingegangen am 18. November 1959

LITERATUR

- 1 Bingeman, C. W., Varner, J. E. und Martin, W. P., The effect of the addition of organic materials on the decomposition of an organic soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **17**, 34 (1953).
- 2 Birch, H. F., The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability. *Plant and Soil* **10**, 9 (1953).
- 3 Duchaufour, P., Humus activ et humus inerte. *Ann. Ecole Natl. Eaux et Forêts et Sta. Recherches et Exp.* **13**, 403, (1953).
- 4 Duchaufour, P., Pochon, J., Mangenot, F. und Barjac, H. de, Etude pédo-biologique des tourbes mises en incubation après neutralisation partielle. *Rapp. VI Congr. Intern. Sci. Sol. Paris* **III**, 419 (1956).
- 5 Ehrhardt, F., Untersuchungen über den Einfluss des Klimas auf die Stickstoffnachlieferung von Waldhumus in verschiedenen Höhenlagen der Tiroler Alpen. *Diss. Staatswirtsch. Fak. Univ. München* (1959).
- 6 Fenton, R. T., A laboratory study of nitrogen mobilisation during litter decomposition. *Plant and Soil* **9**, 202 (1958).
- 7 Frercks, W. und Puffe, D., Über ergänzende Untersuchungen zu Stoffgruppenanalysen an Moorböden und Sandmischkulturen unterschiedlicher Aufkalkung. *Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk.* **33**, 42 (1958).
- 8 Harmsen, G. W. und Schreven, D. A. van, Mineralization of organic nitrogen in soil. *Advances Agron.* **7**, 299 (1955).
- 9 Hesselman, H., Über die Abhängigkeit der Humusdecke von Alter und Zusammensetzung der Bestände im nordischen Fichtenwald von blaubeerreichem *Vaccinium*-Typ und über die Einwirkung der Humusdecke auf die Verjüngung und das Wachstum des Waldes. *Medd. Statens Skogsförsöksanst.* **30**, 529 (1937).
- 10 Jansson, S. L., Tracer studies on nitrogen transformations in soil with special attention to mineralisation - immobilisation relationships. *Kgl. Lantbruks-Högskol. Ann.* **24**, 101 (1958).
- 11 Jensen, H. L., The microbiology of farmyard manure decomposition in soil. III. *J. Agr. Sci.* **22**, 1 (1932).
- 12 Jörgensen, A. und Hansen, A., Mikroorganismen der Gärungsindustrie. 7. Aufl. Nürnberg (1956).
- 13 Kaila, A., Soini, S. und Kivinen, E., Influence of lime and fertilizers upon the mineralization of peat nitrogen in incubation experiments. *J. Sci. Agr. Soc. Finland* **26**, 79 (1954).
- 14 Krauss, G. und Prescher, H., Vergleichende Untersuchung der Kohlendioxidproduktion in Humusproben als Maßstab der Abbautätigkeit. Unveröff. Dipl. arbeit Tharandt (1932).
- 15 Laatsch, W., Dynamik der mitteleuropäischen Mineralböden. 4. Aufl. Dresden-Leipzig (1957).
- 16 Lees, H. und Quastel, J. H., Biochemistry of nitrification in soil. *Biochem. J.* **40**, 803 (1946).
- 17 Mikola, P., Studies on the decomposition of forest litter by basidiomycetes. *Comm. Inst. Forest. Fenn.* **48**, 1 (1956).

- 18 Mork, E. E., The decomposition in the humus layer at different temperatures and degrees of moisture. *Medd. Norske Skogforsoksv.* **6**, 179 (1939).
- 19 Munson, R. D. und Pesek, J. T., The effects of corn residue, nitrogen, and incubation on nitrogen release and subsequent nitrogen uptake by oats: A quantitative evaluation. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **22**, 543 (1958).
- 20 Neller, J. R., Studies on the correlation between the production of carbon dioxide and the accumulation of ammonia by soil organisms. *Soil Sci.* **5**, 225 (1918).
- 21 Newton, J. D., Microbial and nutritional effects of "trash cover" in western Canada's grey wooded, black earth, and brown prairie soils. *Rapp. VI Congr. Intern. Sci. Sol Paris III*, 213 (1956).
- 22 Scheffer, F. und Schachtschabel, P., *Lehrbuch der Agrikulturchemie und Bodenkunde*. I. Bodenkunde. 5. Aufl. Stuttgart (1960).
- 23 Schreven, D. A. van, Onderzoekingen en evaringen inzake de stikstofbemesting in de IJsselmeerpolders. III. Proefnemingen in verband met stikstofmineralisatie in grond. *Van Zee tot Land* **26**, 26 (1958).
- 24 Springer, U. und Klee, J., Die Charakterisierung und Unterscheidung von Waldhumusformen mittels der Natronlauge- und Natriumpyrophosphat-Extraktion und der Stickstoff-Fraktionierung. *Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk.* **80**, 109 (1958).
- 25 Stevenson, J. L., Some observations on the microbial activity in remoistened air-dried soil. *Plant and Soil* **8**, 170 (1956).
- 26 Stevenson, J. L., Influence of low temperatures on nitrogen transformations in Honeoye silt loam. *Soil Sci.* **84**, 243 (1957).
- 27 Vandecaveye, S. C., Effects of stable manure and certain fertilizers on the microbiological activities in virgin peat. *Soil Sci.* **33**, 279 (1932).
- 28 Waydbrink, W. van der, Über die Bedeutung einiger Faktoren für die Zersetzung und Umwandlung eines Buchenwaldrohhumus in eine gärtnerisch nutzbare Erde. *Archiv Gartenbau* **2**, 273 (1954).
- 29 Wittich, W., Untersuchungen über den Verlauf der Streuzersetzung auf einem Boden mit Mullzustand. I-III. *Forstarchiv* **15**, 96 (1939), **19**, 1 (1943), **20**, 1 (1944).
- 30 Wittich, W., Untersuchungen über den Verlauf der Streuzersetzung auf einem Boden mit starker Regenwurmätigkeit. Frankfurt (Main), 1953.
- 31 Wittich, W. und Mainzhausen, L., Untersuchungen über die Stabilität des Bodenhumus und seiner Komponenten unter natürlichen Bedingungen. *Z. Pflanzenernähr. Düng. u. Bodenk.* **75**, 228 (1956).
- 32 Woolridge, W. R. und Glass, V., Variability in the activity of bacterial enzymes. *Biochem. J.* **31**, 526 (1937).
- 33 Zöttl, H., Ein Vergleich zwischen Ammoniakgas- und Stickstoffsalzdüngung in Kiefern- und Fichtenbeständen Bayerns. *Forstwiss. Cbl.* **77**, 1 (1958).
- 34 Zöttl, H., Die Bestimmung der Stickstoffmineralisation im Waldhumus durch den Brutversuch. *Z. Pflanzenern. Düngg. Bodenkde.* **81**, 35 (1958).
- 35 Zöttl, H., Methodische Untersuchungen zur Bestimmung der Mineralstickstoffnachlieferung des Waldbodens. *Forstwiss. Centr.* **79**, 72 (1960).
- 36 Zöttl, H., Die Mineralstickstoffanlieferung in Fichten- und Kiefernbeständen Bayerns. *Forstwiss. Centr.* **79**, 221 (1960).
- 37 Zöttl, H., Dynamik der Stickstoffmineralisation im organischen Waldbodenmaterial. I. Beziehung zwischen Bruttomineralisation und Nettomineralisation. *Plant and Soil* **13**, 166 (1960).
- 38 Zöttl, H., Dynamik der Stickstoffmineralisation im organischen Waldbodenmaterial. III. pH-Wert und Mineralstickstoff-Nachlieferung. *Plant and Soil* **13**, 207 (1960).