

Friedhelm Herbst, Lothar Schmidt, Wolfgang Merbach

Wirkung der Mineraldüngung auf die C- und N-Gehalte im Boden der Hallenser Dauerdüngungsversuche

Effect of mineral fertilization on C and N contents in soil of long-term fertilization trials in Halle/Saale (Germany)

328

Zusammenfassung

In fünf Hallenser Dauerdüngungsversuchen (Ewiger Roggenbau, Feld F1a, Feld F1b, Feld F2a, Bodenbildungsversuch) erhöhten sowohl eine Mineraldüngung (NPK) gegenüber der ungedüngten Variante als auch steigende N-Gaben (0 bis 400 kg N/ha) die C- und N-Gehalte im Boden. Diese Erhöhung steht in enger Beziehung zu den vorjährigen Pflanzenerträgen. Sie ist vor allem durch die im Boden verbliebenen Ernte- und Wurzelrückstände bewirkt worden. Die Mineraldüngung trägt damit zur Erhaltung und Mehrung des Humusgehaltes und der Bodenfruchtbarkeit bei. In den Feldversuchen kam es in den letzten Jahrzehnten in allen Varianten unabhängig von der Düngung zu einer Abnahme der Boden-C- und -N-Gehalte. Die Ursachen dafür waren vor allem die anhaltende Vertiefung der Ackerkrume sowie die Verringerung der C- und N-Emissionen. Zur Wechselwirkung zwischen Pflanzenwachstum und Humusgehalt ist erkennbar, dass der Pflanzenertrag den Humusgehalt viel stärker bestimmt als umgekehrt der Humusgehalt den Pflanzenertrag.

Stichwörter: Dauerdüngungsversuche, Mineraldüngung, Kohlenstoff, Stickstoff, Humus

Abstract

In five long-term fertilization trials in Halle/S. (Eternal Rye, field F1a, field F1b, field F2a, Soil Formation Trial), mineral fertilization (NPK) compared to the unfertilized variant as well as increasing N rates (0–400 kg N/ha)

have shown an increase of the C and N contents in the soil. This increase is closely related to the last year's crop yields. It has mainly been effected by the crop residues in the soil. The mineral fertilization contributed to the preservation and improvement of humus content and soil fertility. In the field trials in the last decades, all variants have shown a decrease in soil C and N contents regardless of the fertilization. The reasons for this was mainly the continued deepening of the ploughed layer and a reduce of the C- and N-emissions. The interdependency between plant growth and humus content is rather expressed by the plant yield determining the humus content much more than vice versa.

Key words: Long-term fertilization trials, mineral fertilization, carbon, nitrogen, humus

Einleitung

In Böden mit einer Vegetation kommt es ständig zu einem Abbau (Mineralisierung) und gleichzeitig durch abgestorbene Pflanzenteile zu einer Neubildung von organischer Bodensubstanz (Humus). Je nachdem, welcher Prozess überwiegt, führt dies zu einer Abnahme oder Zunahme der Humusmenge. Nach Erreichen eines Fließgleichgewichtes zwischen Humusab- und -aufbau wird keine organische Substanz im Boden mehr akkumuliert (KÖRSCHENS et al., 2002).

Beim Anbau von Nutzpflanzen spielen die Düngungsmaßnahmen für die Humusveränderungen eine wichtige Rolle. Mit den organischen Düngemitteln werden neben Nährstoffen vor allem organische Substanzen dem Boden

Institut

Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Institut für Agrar- und Ernährungswissenschaften, Halle/Saale

Kontaktanschrift

Dr. Friedhelm Herbst, Alte Heerstr. 105, 06132 Halle/Saale, E-Mail: herbst.halle@gmail.com

Zur Veröffentlichung angenommen

30. September 2016

zugeführt, die direkt zum Erhalt und zur Erhöhung des Humusgehaltes beitragen.

Die Wirkung von Mineraldüngern auf den Humusgehalt geht dagegen hauptsächlich indirekt von den Ernte- und Wurzelrückständen aus (SCHMALFUSS, 1966). Allerdings kann der Einsatz von mineralischen N-Düngern zu einer verstärkten Mineralisierung von Humusbestandteilen führen, worauf bereits VON BOGUSLAWSKI (1959) und später ZIMMER et al. (2005) hingewiesen haben, was in der Öffentlichkeit gelegentlich negativ bewertet wird (MONTGOMERY, 2010). Eine Klärung dieser Problematik ist daher dringend geboten. Veränderungen des Humusgehaltes lassen sich unter natürlichen Bedingungen zuverlässig nur aus langjährigen Feldversuchen oder Dauerbeobachtungsflächen ableiten (MERBACH et al., 2015).

In Halle/S. bestehen mehrere solcher Feldversuche, in denen in zeitlichen Abständen auch Untersuchungen der C- und N-Gehalte im Boden vorgenommen werden. Bisher wurden diese Versuche zu den genannten Aspekten zusammenfassend noch nicht ausgewertet, was nachfolgend zum ersten Mal vorgenommen wird. Dabei wird auch der Frage nachgegangen, welche Beziehungen zwischen der Ertragsbildung und den C- und N-Gehalten im Boden und umgekehrt zwischen den C- und N-Gehalten und der Ertragsbildung bestehen.

Im Ergebnisteil wird teilweise auf eine unveröffentlichte Arbeit von RÖDER (1976) sowie auf eine Monografie von MERBACH und DEUBEL (2007) zurückgegriffen.

Material und Methoden

Der jüngste ausführliche Überblick zu den Dauerdüngungsversuchen in Halle/S., einschließlich ausgewählter Ergebnisse, liegt von MERBACH und DEUBEL (2007) vor. Von den dort beschriebenen Versuchen werden diejenigen Ergebnisse aus fünf Experimenten dargestellt, welche Aussagen zur Thematik zulassen. Die Feldversuche befinden sich auf dem Julius-Kühn-Feld am Rande von Halle/S. Der Boden ist eine stark lessivierte Schwarzerde (Parabraunerde-Tschernosem) mit lehmigem Sand bis

sandigem Lehm im A-Horizont und kiesführendem Lehm (aus Geschiebemergel) im B-Horizont. Der Standort liegt im mitteldeutschen Trockengebiet mit einem mittleren Jahresniederschlag von ca. 500 mm und einer mittleren Jahrestemperatur von 9,2°C.

Der **Ewige Roggenbau** wurde 1878 von Julius KÜHN mit fünf Düngungsvarianten (ohne Wiederholungen) und Roggenmonokultur angelegt. Die in diesen Prüfvarianten eingesetzten Nährstoffmengen können aus Tab. 1 entnommen werden.

Der Feldversuch **Feld F** zur mineralisch-organischen Düngung wurde 1949 von Karl SCHMALFUSS mit fünf Abteilungen und regelmäßig wechselnden Fruchtarten sowie 4 oder 6 Wiederholungen pro Variante installiert. Von den ehemaligen fünf Abteilungen bestehen noch drei Abteilungen, welche zur Auswertung herangezogen werden.

Im **Feld F1** wird der Einsatz der Nährstoffe N, P und K in mineralischer Form in mehreren Kombinationen (**F1a**) und bei einer Steigerung der Einsatzmengen sowie gleichzeitigem Einsatz von Stallmist (**F1b**) geprüft. Ab 1980 kommen die in Tab. 2 und 3 aufgeführten Nährstoff- und Stallmistmengen zum Einsatz, welche bis dahin mehrfach gesteigert wurden.

Im **Feld F2a** wird die Wirkung einer jährlichen Strohdüngung (50 dt/ha) in Kombination mit gestaffelten mineralischen N-Düngergaben (ohne Stroh 3 N-Stufen, mit Stroh 4 N-Stufen) geprüft (Tab. 4). Für die Ergebnisdarstellung werden die Messwerte des Jahres 1995 ausgewählt, weil in jenem Jahr für alle drei Abteilungen Probenahmen erfolgt sind und letztmalig per Hand vorgenommen wurden.

Der sogenannte **Bodenbildungsversuch** wurde im Herbst 1948 auf dem Gelände des ehemaligen Institutes für Pflanzenernährung und Bodenkunde in Halle, Adam-Kuckhoff-Str. 17b von Karl SCHMALFUSS angelegt und bis 2009 bearbeitet. Dazu wurde in 48 glasierte Tonzylinder von 1 m Länge und 40 cm Innendurchmesser inertes Lösssubstrat aus dem C-Horizont vom Standort Etdorf eingefüllt. In den Gefäßen wurden verschiedene Pflanzen in unregelmäßiger Fruchtfolge angebaut, deren oberirdi-

Tab. 1. Prüfvarianten und jährliche Nährstoffmengen im Ewigen Roggenbau
Test variants and annual amounts of nutrients in Eternal Rye

Variante	ohne	N	PK	NPK	Stallmist
ab 1878	keine Düngung	40 kg N/ha	24 kg P/ha 75 kg K/ha	40 kg N/ha 24 kg P/ha 75 kg K/ha	120 dt/ha ¹⁾
ab 1990	keine Düngung	als NPK + Stallmist weitergeführt ²⁾	24 kg P/ha 75 kg K/ha	60 kg N/ha 24 kg P/ha 75 kg K/ha	60 kg N/ha als Stallmist ³⁾

¹⁾ enthält ca. 65 kg N/ha, ca. 20 kg P/ha und ca. 60 kg K/ha

²⁾ Düngermenge Summe aus NPK- und Stallmist-Variante

³⁾ P- und K-Mengen schwankend

Tab. 2. Prüfvarianten und jährliche Nährstoffmengen ab 1980 im Feld F1a

Test variants and annual amounts of nutrients from 1980 in field F1a

Varianten (Nährstoffeinsatz)					
ohne	NP	NK	PK	NPK	N1PK
Nährstoffmengen					
kg N/ha		kg P/ha		kg K/ha	
Hackfrucht	Getreide	Hackfrucht	Getreide	Hackfrucht	Getreide
100 ¹⁾	50	60	0	300	0

¹⁾ bei der Variante N1PK kommen anstelle 100 kg N/ha 200 kg N/ha zum Einsatz

Tab. 3. Prüfvarianten und jährliche Nährstoffmengen ab 1980 im Feld F1b

Test variants and annual amounts of nutrients from 1980 in field F1b

Variante	Mineraldüngung			Stallmist
	kg N/ha	kg P/ha	kg K/ha	
Einfach (M)	50	40	200	200 dt/ha alle 2 Jahre zu Hackfrüchten ¹⁾
Doppelt (2 M)	100	60	300	
Erhöht (3 M)	200	60	300	
Stallmist (St)				
Stallmist + M (StM)	50	40	200	
Stallmist + 2 M (St2 M)	100	60	300	

¹⁾ enthielt ca. 100 kg N/ha, ca. 40 kg P/ha und ca. 200 kg K/ha

Tab. 4. Prüfvarianten und jährliche N-Mengen (kg N/ha) seit 1974 im Feld F2a

Test variants and annual N amounts (kg N/ha) since 1974 in field F2a

Variante	ohne Strohdüngung			jährliche Strohdüngung			
	N0	N2	N4	N0	N1	N2	N4
Getreide	0	50	100	0	25	50	100
Hackfrucht	0	100	200	0	50	100	200

sche Pflanzenteile sowie die Rübenkörper zur Ernte erfasst und abgeführt wurden. Die Düngung erfolgte ausschließlich in mineralischer Form. Der Versuch teilte sich in eine Reihe mit steigender N-Düngung und in eine Reihe mit steigender P-Düngung (Tab. 5). Pro Variante bestanden 6 Wiederholungen. Die Bearbeitungstiefe betrug stets 12 cm.

Die Bodenprobeentnahme zur Untersuchung der C- und N-Gehalte erfolgte in allen Versuchen in unregelmäßigen Abständen jeweils im Sommer nach der Ernte mit einem Rillenbohrer. Die Probenahmetiefe betrug in den Feldversuchen anfangs 20 cm und ab 2001 bei Verwendung einer Probenahmemaschine 30 cm. Im Bodenbil-

dungsversuch wurden die Bodenproben aus 0–10 cm Tiefe bei 2 Einstichen pro Gefäß entnommen und insgesamt 12 Einstiche pro Variante zu einer Mischprobe vereinigt.

In allen Versuchen wurden der C-Gehalt nach der Methode von TJURIN (Nassveraschung mit Chromschwefelsäure, TJURIN, 1951) und der N-Gehalt nach der KJELDAHL-Methode (Säureaufschluss und Destillation, THUN et al., 1955) bestimmt.

Zur Deutung der Beziehungen zwischen der Ertragsbildung und den C- und N-Gehalten im Boden und umgekehrt zwischen den C- und N-Gehalten und der Ertragsbildung wurden in den dafür geeigneten Versuchen die linearen Korrelationskoeffizienten mit dem Programm

Tab. 5. Prüfvarianten und jährliche N- und P-Mengen im Bodenbildungsversuch
Test variants and annual N and P amounts in Soil Formation Trial

Variante	kg N/ha			Variante	ab 1949	
	ab 1949	ab 1953	ab 1958		kg P ₂ O ₅ /ha	kg P/ha
N0	0	0	0	P0	0	0
N1	25	50	100	P1	20	9
N2	50	100	200	P2	40	17
N4	100	200	400	P4	80	35

P-Düngung einheitlich 35 kg P/ha
 übrige Nährstoffe einheitlich (ab 1958 166 kg K/ha)

N-Dg. einheitlich ab 1958 400 kg N/ha

„Excel“ ermittelt. Mit diesem Programm sind auch die Abbildungen, teilweise einschließlich der Standardabweichung der Messwerte und der Trendanalyse, erstellt worden.

Ergebnisse

Im **Ewigen Roggenbau** führten im gesamten Versuchsverlauf sowohl die Stallmistdüngung als auch die Mineraldüngervarianten gegenüber der ungedüngten Variante zu einer Erhöhung der C- und N-Gehalte im Boden (Abb. 1 und 2). Der deutlichste Anstieg lag bei der Stallmistdüngung vor, gefolgt von der mineralischen NPK-Düngung. Nach einem allgemeinen Anstieg zu Versuchsbeginn ist es in allen Varianten seit den 1960er Jahren zu einer Abnahme der C- und N-Gehalte, auch bei ständiger Stallmistdüngung, gekommen. Seitdem sind die Unterschiede zwischen den Varianten nicht größer, sondern eher kleiner geworden.

In Tab. 6 sind die Korrelationskoeffizienten zwischen dem Kornertrag und dem C- und N-Gehalt im Boden in der darauf folgenden Dekade unter Einbeziehung der unge-

düngten und mineralisch gedüngten Varianten angegeben. Sie betragen im 90-jährigen Mittel für den C-Gehalt $r = 0,86$ und für den N-Gehalt $r = 0,88$ und belegen, dass der Humusgehalt im Boden vom Pflanzenwachstum abhängig ist. In Tab. 7 liegen die Korrelationskoeffizienten zwischen den Boden-C- und -N-Gehalten und dem darauf folgenden Kornertrag vor. Diese fallen im Mittel von 1929 bis 2010 mit $r = -0,49$ zum C-Gehalt und $r = -0,69$ zum N-Gehalt negativ aus, was dafür spricht, dass das Pflanzenwachstum nicht vom Humusgehalt des Bodens abhängig ist. Vor allem in den letzten Jahrzehnten ist es trotz Abnahme der Boden-C- und -N-Gehalte zu einem deutlichen Ertragsanstieg gekommen (Tab. 6), wodurch die negativen Beziehungen in diesem Zeitraum noch stärker ausgeprägt sind.

Im **Feld F1a** führte nach 46 Versuchsjahren nur eine NPK-Volldüngung zur Erhaltung des Boden-C-Gehaltes. Beim N-Gehalt kam es bei allen Prüfvarianten zu einem Abfall gegenüber den Ausgangswerten. Im Vergleich zu „ohne Düngung“ erhöhte auch nur die NPK-Düngung die C- und N-Gehalte (Abb. 3). Beim Verzicht eines der drei Nährstoffe blieb diese Erhöhung aus.

Im **Feld F1b** kam es ebenfalls generell, auch bei Einsatz von Stallmist, zu einem Absinken der Boden-C- und

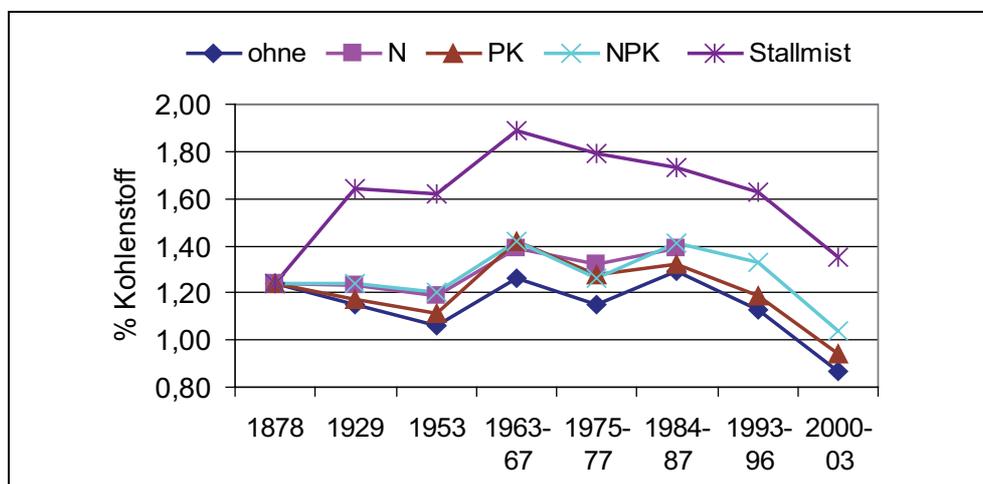


Abb. 1. C-Gehalt im Boden des Ewigen Roggenbaus nach MERBACH und DEUBEL, 2007 (Variantenbezeichnung siehe Tab. 1).
C content in the soil of Eternal Rye after MERBACH und DEUBEL, 2007 (variant designation see Tab. 1)

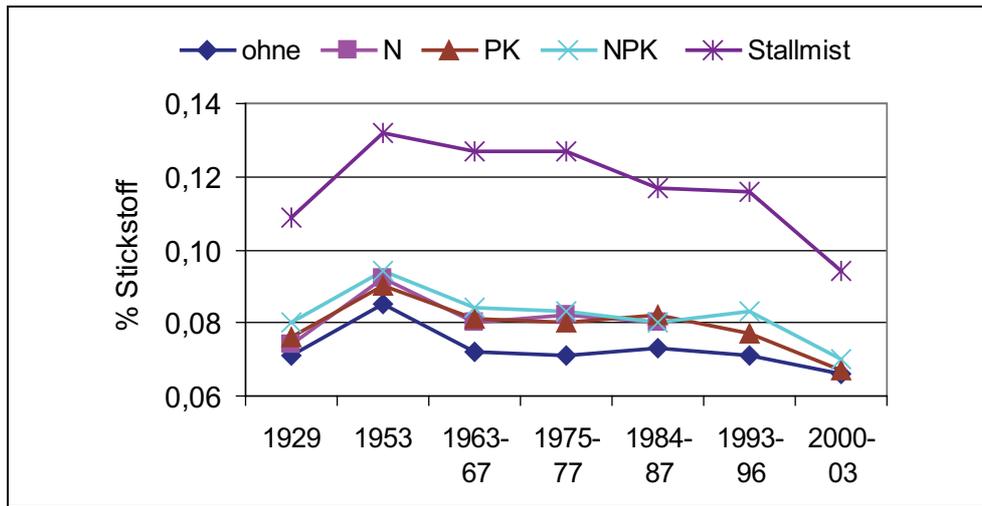


Abb. 2. N-Gehalt im Boden des Ewigen Roggenbaus nach MERBACH und DEUBEL, 2007 (Variantenbezeichnung siehe Tab. 1).
N content in the soil of Eternal Rye after MERBACH und DEUBEL, 2007 (variant designation see Tab. 1)

Tab. 6. Kornerträge im Ewigen Roggenbau und Korrelationskoeffizienten zwischen dem Kornertrag (Dekadenmittel) und dem C- und N-Gehalt im Boden in der darauf folgenden Dekade (n = 4 bzw. 3, Variantenbezeichnung siehe Tab. 1)
Grain yields in Eternal Rye and correlation coefficients between the grain yield (decade average) and the C and N content in soil in the subsequent decade (n = 4 bzw. 3, variant designation see Tab. 1)

Zeitraum Var.	Kornertrag dt/ha (bei 86% TM)				Korr.-koef. zum ¹⁾	
	ohne	N	PK	NPK	C-Gehalt	N-Gehalt
1919–28	10,7	16,3	14,5	23,4	0,87	0,93
1929–38	12,6	16,4	17,5	25,2	0,75	0,98
1939–48	10,7	15,9	13,2	20,7	0,92	0,88
1949–58	10,8	18,0	11,9	24,0	0,91	0,87
1959–68	11,7	17,4	18,8	25,3	0,85	0,95
1969–78	13,5	20,8	20,8	29,6	0,57	0,86
1979–88	15,1	21,3	18,7	29,9	0,90	0,51
1991–00	18,9	–	24,4	44,1	1,00	0,95
2001–10	22,7	–	25,7	50,1	0,95	0,99
Mittel					0,86	0,88

¹⁾ Die zur Berechnung herangezogenen C- und N-Gehalte entsprechen denen in Abb. 1 und 2

-N-Gehalte gegenüber den Ausgangswerten. Tendenziell steigerte die Stallmistdüngung, aber auch eine erhöhte Mineraldüngung diese Gehalte (Abb. 4).

Im **Feld F2a** war mit der steigenden Mineral-N-Düngung sowohl ohne als auch mit gleichzeitiger Strohdüngung tendenziell ein Anstieg der Boden-C- und -N-Gehalte verbunden. Dabei lagen nach 46 Versuchsjahren die C-Gehalte über den Ausgangswerten und die N-Gehalte unter diesen (Abb. 5). Die Strohdüngung erhöhte tendenziell sowohl die C- als auch die N-Gehalte.

Im **Bodenbildungsversuch** nahmen die Boden-C- und -N-Gehalte bis 2005 stetig zu (MERBACH und DEUBEL, 2007, Abb. 6 und 7). Dabei vergrößerte sich die Differenz zwischen der ungedüngten Variante (N0) und der mit der höchsten N-Stufe (N4). Der C-Gehalt erhöhte sich

gegenüber dem Ausgangswert bei der N0-Variante um das 11fache und bei der N4-Variante um das 12fache. Beim N-Gehalt betrug der Anstieg bei N0 das 6fache und bei N4 das 8fache. Die steigende N-Düngung führte in den ersten 25 Versuchsjahren zu einer deutlichen Zunahme der Pflanzenerträge (RÖDER, 1976). Danach stiegen diese trotz steigender C- und N-Gehalte nicht mehr an (SCHILLING und BESCHOW, 1997). Zwischen den bis 1974 ermittelten Trockenmasseerträgen und den sich im Boden eingestellten C- und N-Gehalten besteht eine sehr enge Beziehung (Tab. 8), welche noch deutlicher als beim Ewigen Roggenbau ausfällt. Die N-Düngung hatte auf den Anstieg des Humusgehaltes eine stärkere Wirkung als die P-Düngung (BESCHOW et al., 2000, BESCHOW und MERBACH, 2004; MERBACH und DEUBEL, 2007).

Tab. 7. Korrelationskoeffizienten im Ewigen Roggenbau zwischen dem C- und N-Gehalt im Boden und dem darauf folgenden Kornertrag (Dekadenmittel, n = 7 bzw. 3, Variantenbezeichnung siehe Tab. 1)

Correlation coefficient in Eternal Rye between and the C and N content in soil and the subsequent grain yield (decade average, n = 7 bzw. 3, variant designation see Tab. 1)

Variante	Korrelationskoeffizienten des Kornertrages zum ¹⁾			
	C-Gehalt		N-Gehalt	
	1929–2010	1984–2010	1929–2010	1984–2010
ohne	-0,60	-0,99	-0,64	-0,97
N (bis 1989)	0,51	-	0,18	-
PK	-0,23	-0,88	-0,79	-0,87
NPK	-0,46	-0,85	-0,65	-0,56
Stallmist	-0,67	-0,86	-0,68	-0,73
Mittel (ohne N)	-0,49	-0,90	-0,69	-0,78

¹⁾ Die zur Berechnung herangezogenen Kornerträge sowie C- und N-Gehalte entsprechen denen in Abb. 1 und 2 sowie in Tab. 6

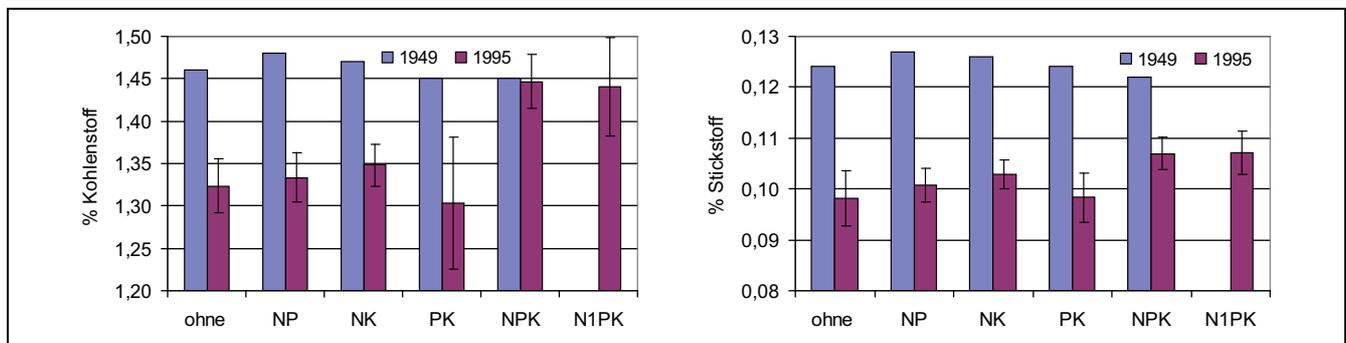


Abb. 3. C-Gehalt (links) und N-Gehalt (rechts) im Boden im Feld F1a mit Standardabweichung (Fehlerbalken) zur Probenahme 1995 (Variantenbezeichnung siehe Tab. 2).

C content (left) and N content (right) in soil in the field F1a with standard deviation (error bars) of sampling in 1995 (variant designation see Tab. 2)

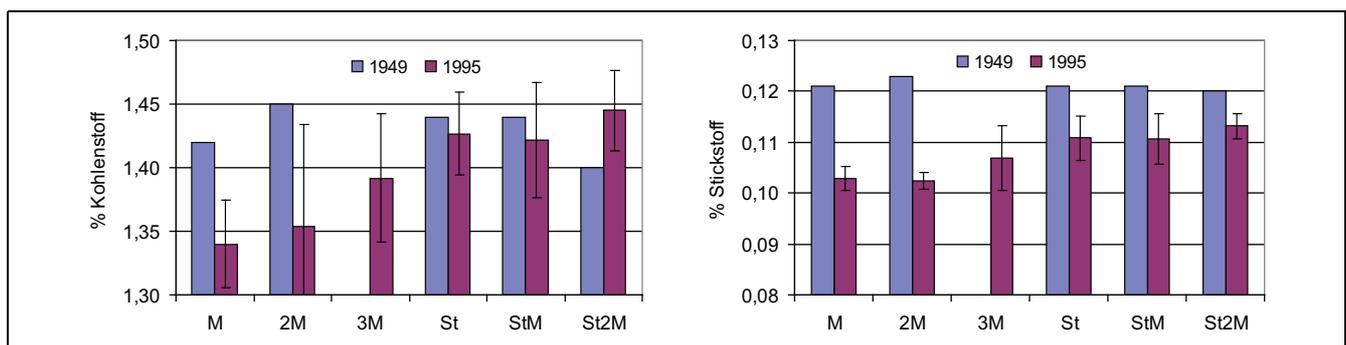


Abb. 4. C-Gehalt (links) und N-Gehalt (rechts) im Boden im Feld F1b mit Standardabweichung (Fehlerbalken) zur Probenahme 1995 (Variantenbezeichnung siehe Tab. 3).

C content (left) and N content (right) in soil in the field F1b with standard deviation (error bars) of sampling in 1995 (variant designation see Tab. 3)

Diskussion

Die Ergebnisse des Ewigen Roggenbaues und des Bodenbildungsversuches belegen deutlich, dass mineralische

Düngungsmaßnahmen zu einer Zunahme der C- und N-Gehalte im Boden führen können. Diese wird allein durch die Pflanzenrückstände bewirkt. Der im Boden gebundene Kohlenstoff stammt fast vollständig aus der

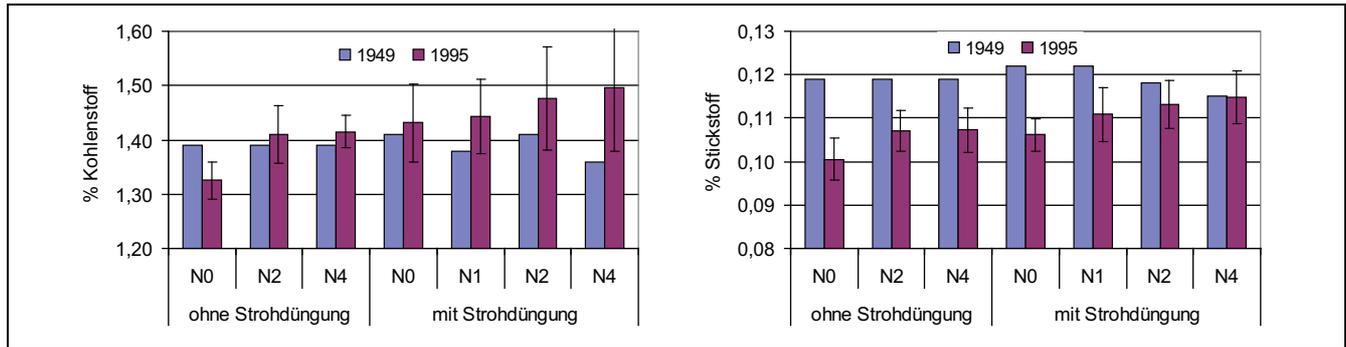


Abb. 5. C-Gehalt (links) und N-Gehalt (rechts) im Boden im Feld F2a mit Standardabweichung (Fehlerbalken) zur Probenahme 1995 (Variantenbezeichnung siehe Tab. 4).
C content (left) and N content (right) in soil in the field F2a with standard deviation (error bars) of sampling in 1995 (variant designation see Tab. 4)

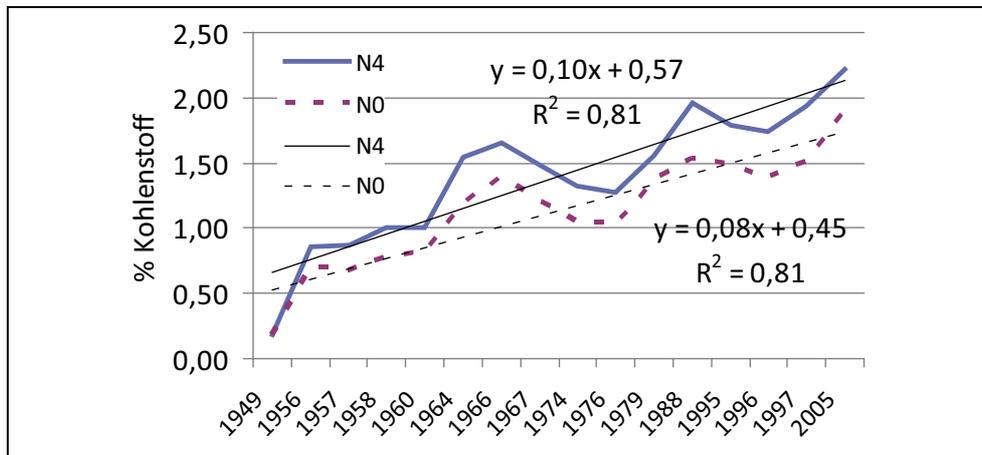


Abb. 6. Entwicklung des C-Gehaltes im Boden des Bodenbildungsversuches nach MERBACH und DEUBEL, 2007 (Variantenbezeichnung siehe Tab. 5).
Development of the C content in soil of Soil Formation Trial after MERBACH und DEUBEL, 2007 (variant designation see Tab. 5)

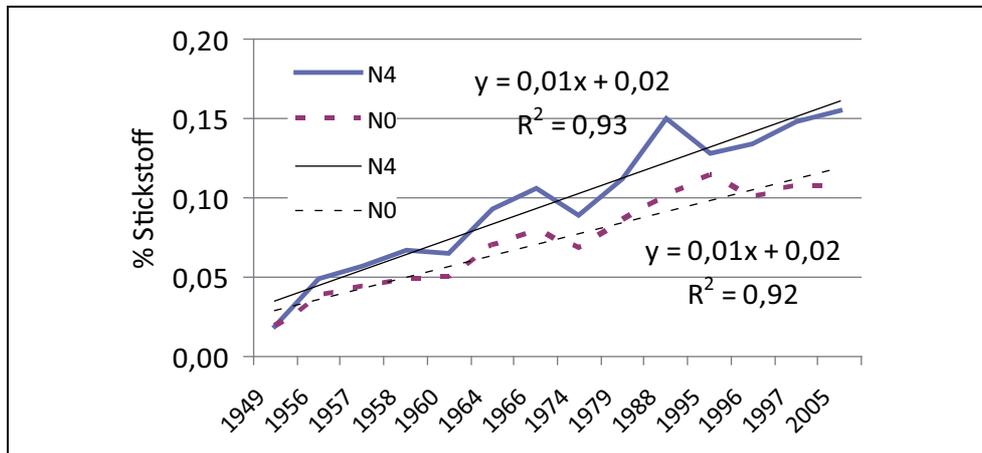


Abb. 7. Entwicklung des N-Gehaltes im Boden des Bodenbildungsversuches nach MERBACH und DEUBEL, 2007 (Variantenbezeichnung siehe Tab. 5).
Development of the N content in soil of Soil Formation Trial after MERBACH und DEUBEL, 2007 (variant designation see Tab. 5)

CO₂-Assimilation der Pflanzen. Bei der Variante ohne N-Düngung ist die Quelle für den Stickstoff ebenfalls nahezu komplett die Luft. Die C- und N-Zufuhren mit dem Saatgut spielen hierbei keine entscheidende Rolle.

Die Ergebnisse machen weiterhin deutlich, dass die N-Düngung eine besondere Rolle bei der Ertragssteigerung und somit auch bei der Humusanreicherung spielt. Einerseits wird mineralischer Stickstoff immobilisiert

und andererseits kann der Mineral-N den Humusabbau fördern. Nach SCHARF (1967) wirkt der Dünger-N, der die zur Erreichung des Ertragsmaximums notwendige N-Menge übersteigt, humuserhaltend. KERSCHBERGER (1994) kommt zu dem Schluss, dass negative N-Bilanzen zum Humusabbau und positive Bilanzen zum Humusaufbau führen. Positive N-Bilanzen sollten jedoch nicht zum Zwecke der Humuserhaltung und -mehrung angestrebt

Tab. 8. Summe der Pflanzenerträge von 1949–1974 und C- und N-Gehalte im Boden 1974 nach RÖDER (1976) sowie ermittelte Korrelationskoeffizienten im Bodenbildungsversuch (n = 4, Variantenbezeichnung siehe Tab. 5)*Total crop yields of 1949–1974 and C and N content in soil in 1974 after RÖDER (1976) and calculated correlation coefficients in Soil Formation Trial (n = 4, variant designation see Tab. 5)*

Var.	Trockensubstanz		C-Gehalt			N-Gehalt		
	g/Gef.	relativ	%	relativ	relativ	%	relativ	relativ
Ausgangsboden (1948)			0,18	100	–	0,019	100	–
N0	1567	100	1,06	588	100	0,068	358	100
N1	2765	176	1,28	711	121	0,081	426	119
N2	3774	241	1,33	739	125	0,088	463	129
N4	4831	308	1,38	767	130	0,095	500	140
Korr.-koef. zum TS-Ertrag			0,94			0,99		

werden, da mit ihnen negative Auswirkungen auf die Umwelt (Atmosphäre, Wasser) verbunden sein können.

In dem Maße, wie der Düngereinsatz das Pflanzenwachstum steigert, werden mit den Pflanzenrückständen erhöhte C- und N-Mengen für die Humusreproduktion zur Verfügung gestellt. Die Mineraldüngung leistet damit einen wesentlichen Beitrag zur Erhaltung und Mehrung des Humusgehaltes und der Bodenfruchtbarkeit. Der Umfang dieses Beitrages hängt erheblich von den angebauten Fruchtarten ab (KLIMANEK, 1997).

In den ausgewerteten Feldversuchen ist die humuserhöhende Wirkung der Mineraldüngung weniger deutlich erkennbar als im Bodenbildungsversuch, weil in den Feldexperimenten bereits zu Versuchsbeginn ein hoher Humusgehalt im Boden vorlag. Außerdem beeinträchtigt die generelle Abnahme der C- und N-Gehalte in den letzten Jahrzehnten das Sichtbarwerden dieses Prozesses. Als Hauptursache für den Rückgang der C- und N-Gehalte kommt die fortlaufende Vertiefung der Ackerkrume auf dem Kühnfeld in Betracht (HERBST und SCHMIDT, 2009; MERBACH et al., 2013). Diese Vertiefung setzte Ende der 1960er Jahre mit der Umstellung vom pferdegezogenen auf den traktorgezogenen Pflug ein (von 20 auf 25 cm Krumentiefe) und wurde seit den 1990er Jahren bis zur Gegenwart durch den Einsatz immer stärkerer Traktoren und größerer Pflugschare fortgesetzt. Seit der Jahrtausendwende ist die Pflugtiefe von ca. 30 cm auf jetzige ca. 35 cm vergrößert worden. Das oftmals erkennbare Hochpflügen von „totem“ Boden führte zweifellos zu einer „Verdünnung“ der C- und N-Gehalte in der Ackerkrume. So lag z.B. 1959 bei der NPK-Variante in der Bodenschicht 20–40 cm der C-Gehalt bei nur 55% des Gehaltes in 0–20 cm (GARZ, 1979). Im Jahre 2006 waren es in 30–60 cm Tiefe beim C-Gehalt nur 64% und beim N-Gehalt sogar nur 40% der Gehalte in 0–30 cm. Mit der „Verdünnung“ der Gehalte war aber vermutlich keine Veränderung der C- und N-Gesamtmengen im Boden verbunden, da diese Mengen nur auf ein größeres Bodenvolumen verteilt wurden.

Neben der Krumentiefung könnte bei der Abnahme der C- und N-Gehalte auch eine verstärkte Mineralisie-

rung von Humusbestandteilen infolge erhöhter Temperaturen in den letzten Jahrzehnten eine Rolle gespielt haben (MERBACH et al., 2013). Weiterhin kann von Bedeutung sein, dass es ab den 1970/80er Jahren zu einem Rückgang des Flugstaubeintrages aus dem Hausbrand und dem nahe liegenden starken Zugverkehr gekommen ist, der davor einen bedeutenden Umfang eingenommen hatte (SCHARF, 1967, SCHMIDT und MERBACH, 2004). In den letzten Jahrzehnten hat sich auf dem Versuchsfeld in Halle neben dem partikulären C-Eintrag auch der N-Eintrag aus der Luft vermindert (HERBST und SCHMIDT, 2009, MERBACH et al., 2013).

Ungeklärt bleibt, weshalb es – wie bereits in den Untersuchungen von SCHARF (1967) Anfang der 1960er auf dem Feld E des Kühnfeldes – teilweise zu einer Erhöhung bzw. Nichtabnahme der C-Gehalte, aber gleichzeitig zu einer Verringerung der N-Gehalte im Boden gekommen ist.

Wie insbesondere der Bodenbildungsversuch erkennen lässt, spielt für die Richtung und das Ausmaß der Veränderungen des Humusgehaltes im Boden dessen Ausgangsniveau eine entscheidende Rolle (KÖRSCHENS et al., 2002). Bei einem niedrigeren Ausgangsgehalt kommt es eher zu einer Zunahme als bei hohem Ausgangsgehalt und umgekehrt.

Bemerkenswert sind die Ergebnisse des Ewigen Roggenbaus zur Wechselwirkung zwischen dem Pflanzenwachstum und dem Humusgehalt des Bodens. Sie zeigen, dass in diesem Versuch der Pflanzenertrag viel stärker den Humusgehalt bestimmt als umgekehrt der Humusgehalt den Pflanzenertrag. In Untersuchungen von STUMPE et al. (2000) im Feld F3 des Kühnfeldes wurde weiterführend nachgewiesen, dass Unterschiede im Humusgehalt des Bodens nicht zu Ertragsunterschieden geführt haben, wenn ein entsprechender Mineraldünger-N-Ausgleich erfolgt war. Bereits SCHMALFUSS sah nach 17-jähriger Versuchsdurchführung des Bodenbildungsversuches mit seinen Ergebnissen den Beweis erbracht, dass „die höhere Pflanze den Humus nicht als Nährstoff bedarf, sondern sie sich ausschließlich von Mineralstoffen ernährt“ (SCHMALFUSS, 1966).

Von den Dauerdüngungsversuchen im Osten Deutschlands ergeben die Versuche in Bad Lauchstädt (KÖRSCHENS, 1997), Bad Salzung, Methau und Spröda (ANSORGE und PÖSSNECK, 1992; ALBERT und PÖSSNECK, 1995; ZORN und SCHRÖTER, 2015) ähnliche positive Effekte der Mineraldüngung auf die Boden-C- und -N-Gehalte wie in Halle. Die jüngsten Untersuchungen in Methau und Spröda (GRUNERT und ALBERT, 2012) konnten jedoch diese Wirkung nicht bestätigen. Auch im N/Stroh-Dauerdüngungsversuch Thyrow wurde kein eindeutig positiver Effekt steigender N-Düngung auf den C-Gehalt des Bodens nachgewiesen (SCHWEITZER et al., 2015). In Groß Kreutz (ZIMMER et al., 2005) lag bei Mineraldüngung ein geringerer C- und N-Gehalt als in der ungedüngten Variante vor. Eine zeitliche Abnahme der C- und N-Gehalte im Boden sowohl bei mineralisch als auch organisch gedüngten Varianten ist wie in den Hallenser Feldversuchen auch im statischen Nährstoffmangelversuch in Thyrow zu verzeichnen (ELLMER und BAUMECKER, 2005). Diese Abnahme wurde von den Autoren vorrangig auf einen erwärmungsbedingten verstärkten Humusabbau zurückgeführt. KÖRSCHENS et al. (2014) weisen jedoch in Auswertung zahlreicher Untersuchungen nach, dass es in den letzten Jahrzehnten in Deutschland nicht zu einer klimabedingten Verringerung der Humusgehalte gekommen ist.

Da Veränderungen des Humusgehaltes nur sehr allmählich von statten gehen, erfordert ihr Nachweis höchste Sorgfalt bei der Bodenprobenahme und Analyse sowie „geeichte“ Analysenverfahren. Die Maschinen, welche für die Entnahme von Bodenproben unter Praxisbedingungen entwickelt worden sind, können oftmals eine gleichbleibende und ausreichende Probenahmengenauigkeit unter Versuchsbedingungen nicht gewährleisten.

Selbst bei der Gewährleistung einer hohen Sorgfalt bei der Probenahme und Analyse der Boden-C- und -N-Gehalte, ist es häufig schwierig, einen statistisch gesicherten Nachweis über Veränderungen zu erbringen. In den vorgenommenen Auswertungen war es nur bei Feld F möglich, eine varianzanalytische Auswertung vorzunehmen. Dabei ist erkennbar, dass die Streuung der Einzelmesswerte beim C-Gehalt generell größer ist als beim N-Gehalt. Die Ursache dafür könnte neben der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität der C-Gehalte (KÖRSCHENS, 2010) auch in der verwendeten C- Analyseverfahren liegen.

Zusammenfassend ist zu vermerken, dass die Mineraldüngung den Humusgehalt des Bodens – zumindest auf humusarmen Böden – entgegen zuweilen geäußelter Befürchtungen über vermehrte Ernte- und Wurzelrückstände erhöht.

Literatur

- ALBERT, E., J. PÖSSNECK, 1995: Wirkung einer langjährig differenzierten mineralisch-organischen Düngung auf Ertragsleistung, Humusgehalt und N-Bilanz. VDLUFA-Schriftenreihe **40**, 675-678.
- ANSORGE, H., J. PÖSSNECK, 1992: Untersuchungen über den Einfluß einer langjährig differenzierten organischen Düngung auf die Wirkung der mineralischen N-Düngung und den Boden auf drei Standorten. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig Halle. Symposium Dauerfeldversuche und Nährstoffdynamik 9.–12.6.1992 in Bad Lauchstädt, Leipzig, DS-Druck-Storm GmbH, 53-59.
- BESCHOW, H., A. GRANSEE, W. MERBACH, 2000: Soil development on loess substrate in central Germany – results of a long-term trial on soil formation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **163**, 359-365.
- BESCHOW, H., W. MERBACH, 2004: Entwicklung der organischen Bodensubstanz (OBS) auf Löss in Abhängigkeit von unterschiedlicher Düngung am Beispiel des Bodenbildungsversuches in Halle/Saale. *Arch. Agron. Soil Sci.* **50**, 59-64.
- ELLMER, F., M. BAUMECKER, 2005: Der Statische Nährstoffmangelversuch Thyrow. Ergebnisse nach 65 Versuchsjahren. *Arch. Agron. Soil Sci.* **51**, 151-161.
- GARZ, J., 1979: 100jähriges Bestehen des Versuches „Ewiger Roggenbau“ Halle. *Arch. Acker- u. Pflanzenbau u. Bodenkd.* **23**, 563-571.
- GRUNERT, M., E. ALBERT, 2012: Mineralisch-organische Düngung in Dauerversuchen – Wirkung auf Erträge, Boden und N-Bilanzen. VDLUFA-Schriftenreihe **68**, 492-503.
- HERBST, F., L. SCHMIDT, 2009: 130 Jahre Ewiger Roggenbau: Vergangenheit – Gegenwart – Zukunft. In: W. MERBACH, F. HERBST (Hrsg.): 130 Jahre Ewiger Roggenbau in Halle/S. Stuttgart, Grauer Verlag Beuren, Mitteilungen Agrarwissenschaften **16**, 33-44.
- KERSCHBERGER, M., 1994: Optimale N-Düngung sichert hohe Erträge, ausgeglichene N-Bilanzen und niedrige Nmin-Gehalte des Bodens. *Mitt. Dt. Bkd. Gesell.* **73**, 63-66.
- KLIMANEK, E.-M., 1997: Bedeutung der Ernte- und Wurzelrückstände landwirtschaftlich genutzter Pflanzenarten für die organische Substanz des Bodens. *Arch. Agron. Soil Sci.* **41**, 485-511.
- KÖRSCHENS, M., I. MERBACH, E. SCHULZ, 2002: 100 Jahre Statistischer Düngungsversuch Bad Lauchstädt. UFZ-Umweltforschungszentrum Leipzig-Halle GmbH.
- KÖRSCHENS, M., 1997: Abhängigkeit der organischen Bodensubstanz (OBS) von Standort, und Bewirtschaftung sowie ihr Einfluss auf Ertrag und Bodeneigenschaften. *Arch. Agron. Soil Sci.* **41**, 435-463.
- KÖRSCHENS, M., 2010: Der organische Kohlenstoff im Boden (Corg) – Bedeutung, Bestimmung, Bewertung. *Arch. Agron. Soil Sci.* **56**, 375-392.
- KÖRSCHENS, M., E. ALBERT, M. BAUMECKER, F. ELLMER, M. GRUNERT, S. HOFFMANN, T. KISMANYOKI, J. KUBAT, E. KUNZOVA, M. MARX, J. ROGASIK, J. RINKLEBE, J. RÜHLMANN, C. SCHILLI, H. SCHRÖTER, S. SCHROETTER, K. SCHWEITZER, Z. TOT, J. ZIMMER, W. ZORN, 2014: Humus und Klimaänderung – Ergebnisse aus 15 langjährigen Dauerfeldversuchen. *Arch. Agron. Soil Sci.* **60**, 1485-1517.
- MERBACH, W., A. DEUBEL, 2007: The long-term Fertilization Trials in Halle/Saale, Germany. A Tool for Sustainable and Environmentally Compatible Land Management – Contributions of Plant Nutrition Science in Halle 13. Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag GWV Fachverlage GmbH.
- MERBACH, W., F. HERBST, H. EISSNER, L. SCHMIDT, A. DEUBEL, 2013: Influence of different long-term mineral-organic fertilization on yield, nutrient balance and soil C and N contents of a sandy loess (Haplic Phaeozem) in middle Germany. *Arch. Agron. Soil Sci.* **59**, 1059-1071.
- MERBACH, W., F. HERBST, L. SCHMIDT, 2015: Dauerversuche – museales Relikt oder wissenschaftliche Herausforderung? VDLUFA-Schriftenreihe **71**, 112-121.
- MONTGOMERY, D.R., 2010: Dreck – Warum unsere Zivilisation den Boden unter den Füßen verliert. München, Oekom Verlag.
- RÖDER, K.-L., 1976: Der Einfluß der mineralischen Düngung auf die Reproduktion der organischen Substanz in einem Modellversuch unter Freilandbedingungen. Ing.-Arbeit, Ingenieurschule für Agrochemie und Pflanzenschutz “Edwin Hoernle“ Halle/S.
- SCHARF, H., 1967: Der Einfluß verschiedener N-Formen und N-Mengen auf den C- und N-Gehalt des Bodens in einem langjährigen Düngungsversuch. *Albrecht-Thaer-Arch.* **11**, 133-141.
- SCHILLING, G., H. BESCHOW, 1997: Bodenentstehung und Bodenfunktionen auf Löß am Beispiel eines seit 1948 laufenden Dauerversuches. *Mitt. Dt. Bkd. Gesell.* **85**, 1013-1016.
- SCHMALFUSS, K., 1966: Zur Kenntnis der Bodenbildung. *Sitz.-Ber. Sächs. Akad. Wiss. Leipzig Math.-Nat. Kl.* **107** (3) 1-13.
- SCHMIDT, L., W. MERBACH, 2004: Reaktion des Boden-C und N-Gehaltes auf Düngung – Ergebnisse von Dauerversuchen in Halle/S., Deutschland. *Arch. Agron. SoilSci.* **50**, 49-57.
- SCHWEITZER, K., B. KROSCHEWSKI, M. BAUMECKER, 2015: Spezifische Wirkung organischer Düngung: Wie wirkt sich der positive Effekt auf den Corg-Gehalt im Boden auf den Ertrag und auf die Nährstoffverwertung aus? VDLUFA-Schriftenreihe **71**, 249-256.
- THUN, R., R. HERRMANN, E. KNICKMANN, 1955: Methodenbuch, Bd. I: Die Untersuchung von Böden. 3. Aufl.
- TJURIN, J., 1951: K metodike analize dlja sravnitel'nogo izucenija pocvenogo gumuze. *Tr Pochv Im Dokučeva AN SSR* **38**, 15-25.

- STUMPE, H., J. GARZ, W. SCHLIEPHAKE, L. WITTENMEYER, W. MERBACH, 2000: Effects of humus content, farmyard manuring, and mineral fertilization on yield and soil properties in a long-term trial. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* **163**, 657-662.
- VON BOGUSLAWSKI, E., 1959: Das Zusammenwirken von Gründüngung und Stickstoffdüngung auf den C- und N-Umsatz im Boden. *Z. Pflanzenernähr., Düng., Bodenkd.* **84**, 85-93.
- ZIMMER, J., M. ROSCHKE, D. SCHULZE, 2005: Einfluss unterschiedlicher organischer und mineralischer Düngung auf Ertragsleistung, organische Bodensubstanz und N-Bilanz eines diluvialen Sandbodens – Ergebnisse nach 45 Jahren Dauerfeldversuch P60 (Groß Kreutz, 1959–2003). *Arch. Agron. Soil Sci.* **51**, 135-149.
- ZORN, W., H. SCHRÖTER, 2015: Wirkung differenzierter organischer und mineralischer Düngung auf Ertrag, N-Saldo und Humusgehalt im Boden – Ergebnisse aus dem Dauerdüngungsversuch L28 in Bad Salzig nach 50 Jahren. *VDLUFA-Schriftenreihe* **71**, 131-140.