

40 Jahre Daueraufbringungsversuch DA/58 – ein Beitrag zur Boden- und Ertragsentwicklung landwirtschaftlich genutzter schwefel- und kohlehaltiger Kippenböden

JOACHIM KATZUR & LUTZ BÖCKER

Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB), Finsterwalde, Germany

(Received 12 November 2004; accepted 10 March 2005)

2. Mitteilung: Entwicklung der Humus- und Nährstoffverhältnisse sowie der Pflanzenerträge

Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird am Beispiel ausgewählter Kennwerte über die Entwicklung der Humus- und Nährstoffverhältnisse landwirtschaftlich genutzter kohle- und schwefelhaltiger Kippenböden, die mit unterschiedlich hohen Kalkgaben melioriert und anschließend mit nährstoffreichen Industrierabwässern behandelt wurden, berichtet. Diese Kippenböden entwickeln sich unter dem Nutzungseinfluss futterpflanzenbetonter Fruchtfolgen im Verlaufe von 30 bis 40 Jahren zu produktiven Pflanzenstandorten mit einem mittleren Rohertrag von 50 bis 55 dt GE · ha⁻¹ · a⁻¹.

Stichwörter: *landwirtschaftliche Rekultivierung, Humusverhältnisse, Nährstoffverhältnisse, Pflanzenerträge*

(40 years continuous application trial DA/58 – a contribution to the soil- and yield development of agricultural used sulphur- and lignite containing post coal mining soils)

2. Announcement: Development of humus- and nutrition ratios as well as plant yields

Abstract

In this paper it is reported about the development of humus- and nutrition ratios on chosen exemplary parameters of agricultural used lignite- and sulphur-bearing post mining soils, which are ameliorated by

Correspondence: L. Böcker, Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB), Brauhausweg 2, D-03238 Finsterwalde, Germany. E-mail: l.boecker@fib-ev.de L. Böcker, Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB), Brauhausweg 2, D-03238 Finsterwalde, Germany. E-mail: l.boecker@fib-ev.de

application of different high amounts of lime and afterwards treated with nutrition rich industry-waste water. These post mining soils develop towards productive plant stands characterized by an average yield of $50-55 \text{ dt GE} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ under utilization impact of fodder plant crop rotation.

Keywords: *Agricultural recultivation, humus ratios, nutrition ratios, plant yields*

1. Einleitung

In der ersten Mitteilung wurde über die Auswirkungen unterschiedlich hoher CaO-Gaben, appliziert in Form von Düngekalken oder Braunkohlenaschen in Kombination mit einer mehrjährigen Abwasserlandbehandlung vor Rekultivierungsbeginn, auf die Entwicklung der Aciditäts- und Basensättigungsverhältnisse schwefelhaltiger Kippenböden berichtet (Katzur und Böcker 2005). Eine nachhaltige, d.h., mehrere Jahrzehnte andauernde deutliche Verbesserung der Bodenreaktion wurde erreicht, wenn die mit $500 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ Braunkohlenasche und 3.798 mm Bioschlamm ausgebrachte bodenwirksame CaO-Gabe rund $924 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$ betrug.

Zur Stabilisierung der Reaktionsverhältnisse infolge geogener und pedogener Versauerungsprozesse waren mehrere Erhaltungs- und/oder Gesundungskalkungen erforderlich. Die bei der Vorzugsvariante der Grundmelioration insgesamt ausgebrachte CaO-Gabe von ca. $1.000 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$ entsprach annähernd dem aus der Säure-Basen-Bilanz (SBB) des Kippenbodens für $\text{pH}_{\text{KCL}} 5,5$ und eine 60 cm mächtige Bodenschicht errechneten Kalkbedarf von rund $1.070 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1}$ CaO. Dieses Ergebnis bestätigt erneut die SBB als Methode der Kalkbedarfsbestimmung schwefelhaltiger Kippenböden.

In diesem Beitrag werden die Ergebnisse zur Entwicklung der Humus- und Nährstoffverhältnisse sowie der Pflanzenerträge in Abhängigkeit von den Meliorationsvarianten des 1958 angelegten Daueraufbringungsversuches vorgestellt und diskutiert.

2. Material und Methode

Der Daueraufbringungsversuch wurde bereits in der ersten Mitteilung ausführlich beschrieben, so dass darauf verwiesen werden kann. In der Tabelle I sind die für die Interpretation der Versuchsergebnisse erforderlichen Informationen zusammengestellt.

Alle Parzellen wurden seit 1962 einheitlich bestellt. Die Differenzierungen bei den Reinnährstoff (RN)-Gaben ergeben sich aus den unterschiedlichen Mg-, K- und P-Gehalten der Braunkohlenaschen (V 2, V 5), den von der Höhe der Kalkmergelgaben abhängigen Mg-Zuführungen (V 1 bis V 5) und teils aus den Stallmistgaben bei V 1, V 3 und V 5 (N, P, K, Mg), teils aus den zusätzlichen Bioschlammgaben bei V 1 (N, P, K, Ca).

Die Bodenproben wurden in unregelmäßigen Zeitabständen mit Pürckhauer Bohrern aus den Tiefenstufen $5-15 \text{ cm}$, $25-35 \text{ cm}$, $55-65 \text{ cm}$ und im Jahr 1998 noch zusätzlich aus $150-160 \text{ cm}$ Tiefe entnommen. Für jede Parzelle wurde pro Tiefenstufe eine repräsentative Bodenmischprobe aus 10 Einstichen zusammengestellt. Die Mischprobe wurde u.a. auf folgende Merkmale untersucht:

- C_t (%) (DIN ISO 10694)
- N_t (%) (DIN ISO 13878)
- K_{DL} , P_{DL} (mg/100 g FB) (LUFA Bd. 1 A 6.2.1.2)
- $\text{Mg}_{(\text{CaCl}_2)}$ (mg/100g FB) (LUFA Bd. 1 A 6.2.4.1)
- N_{min} (mg/100 g FB) (Berechnung aus NH_4^+ -N und NO_3 -N)
- NH_4 -N, NO_3 -N (mg/100 g FB) (LUFA Bd. 1 A 6.1.4.1)
- C_{hwl} (g/kg FB) (LUFA Bd. 1 A 6.1.7.1)

Tabelle I. Angaben zu den Meliorationsvarianten des Daueraufbringungsversuches (DA 58).
 Table I. Information about the amelioration plots of the continuous application trial (DA 58).

Variante	Kalkwerte der Neutralisationsmittelgaben in dt · ha ⁻¹ CaO										RN-Nährstoffgaben von 1962–2001 (dt · ha ⁻¹)			
	Kalkdüngemittel					Bioschlamm/ Bioendwasser		Alkalische Mineraldünge- mittel (1962–2001)	Stallunggabe (dt · ha ⁻¹ FM)		N	P	K	Mg
	1958 (Okt.)	1965 (Jun.)	1988 ^{***} (Nov.)	1993 ^{***} (Apr.)	1998 ^{***} (Sept.)	1958– 1965	1966– 1968		1988 (Nov.)	1991 (Aug.)				
V 1	-	108 ^{***}	50	91	33	61	4	63	300	200	64,7	16,6	45,4	23,9
V 2	-	493 ^{**}	17	44	-	57	4	63	-	-	52,4	15,5	48,6	15,3
V 3	100 [*]	76 ^{***}	52	66	13	57	4	63	300	200	57,2	16,0	44,5	18,6
V 4	200 [*]	-	56	91	22	57	4	63	-	-	52,4	14,9	37,9	14,6
V 5	873 ^{**}	-	18	48	-	57	4	63	300	200	57,2	16,5	44,5	7,9

*Branntkalk

**Braunkohlenasche

***Kalkmergel

- N_{hwl} (mg/kg FB) (LUFA Bd. 1 A 6.1.7.1)
- K_t (‰), Mg_t (‰), P_t (‰) in 10 %igem HCl-Auszug (DIN 38 406, E 22)
- Farbquotient $Q_{4/6}$ nach Reuter (1967) mit modifizierter Extraktion der Huminsäuren nach Markgraf (1970)

Die Pflanzenerträge (Haupt- und Nebenprodukte) wurden regelmäßig erfasst. Die Trockensubstanzgehalte der Ernteprodukte konnten aus Kapazitätsgründen nicht bei allen Kulturen bestimmt werden, so dass in die Versuchsauswertung nur die Frischmasseerträge einbezogen wurden.

Die Ergebnisse wurden varianzanalytisch und mittels Regressionsanalysen statistisch ausgewertet (Weber 1967).

3. Ergebnisse und Diskussion

3.1 Humusverhältnisse

Der Bodenumus kohlehaltiger Kippenböden besteht aus einem Gemisch rezenter und fossiler organischer Substanzen (OS), deren Anteile durch ^{14}C -Altersdatierung quantifiziert werden können (Kögel-Knabner et al. 1996). Humuschemische Untersuchungen mittels Pyrolyse-Gaschromatographie/Massenspektrometrie (PY-GC/MS) belegen, dass in den seit > 30 Jahren landwirtschaftlich genutzten Kipp-Kohlelehmsanden die Kohlehuminstoffe dominieren (Fischer et al. 1999). Die extrahierten Kohlehuminstoffe (Humin- und Fulvosäuren) besitzen zwar etwas höhere N-Gehalte als die der bodengeologischen Ausgangssubstrate, sind aber dennoch strukturell den Kohlehuminstoffen zuzuordnen (Fischer et al. 1999). Hiernach erfolgen Aufbau und Anreicherung N-reicher rezenter Huminstoffe in den kohlehaltigen Kippsubstraten relativ langsam. Vermutlich werden in den kohlehaltigen Ackerböden die mikrobiell leichter abbaubaren organischen Substanzen wie beispielsweise die Ernte- und Wurzelrückstände (Nährhumus) bevorzugt mineralisiert, während die fossilen Huminstoffe (Dauerhumus) nicht bzw. nur geringfügig und die in kalter Natronlauge unlöslichen Anteile der kohligen Beimengungen wie beispielsweise Lignine und ihre Abbauprodukte durch oxidative Ammonolyse stärker umgewandelt werden. Letzteres zeigt sich möglicherweise in dem Anstieg der KAKpot (Katzur et al. 2002) und in der höheren C-Ausbeute an extrahierbaren Huminstoffen (Fischer et al. 1999). Inwieweit diese aus mehreren Einzeluntersuchungen abgeleiteten Vermutungen zutreffend sind, kann nur durch zeitgleiche boden- und humuschemische Untersuchungen geklärt werden.

Die Entwicklung der C_t -Gehalte ist durch starke jährliche Schwankungen in allen Bodenschichten gekennzeichnet (Tabelle II). Das ist einerseits auf mögliche Probenentnahmefehler, bedingt durch die räumliche Heterogenität der kohlehaltigen Kippenböden und die dementsprechend zu geringe Anzahl von Wiederholungen ($n = 4$) sowie andererseits auf die pflanzenartabhängige Menge an Ernte- und Wurzelrückständen zurückzuführen. Weitere Einflussfaktoren sind der von den Aciditätsverhältnissen beeinflusste, mikrobiell gesteuerte Ab- und Umbau der organischen Substanzen. Generell gilt, dass nach Verbesserung der Aciditäts- und Nährstoffverhältnisse die C_t -Gehalte abnehmen und die C/N-Verhältnisse bis in 65 cm Bodentiefe enger werden, wie ein Vergleich mit den Ausgangswerten von 1958 (7,4 % C_t , C/N > 60) zeigt.

Die größten Veränderungen werden während der ersten 14 bis 16 Rekultivierungsjahre beobachtet. Offensichtlich sind nach Abschluss der Abwasserlandbehandlung und unter den Bedingungen des ausschließlichen Anbaues einjähriger Futterpflanzen (1962 - 1966) die mit dem Bioschlamm (0,6 - 1,5 Masse-% TS) in großen Mengen zugeführten, biologisch leicht

Tabelle II: Entwicklung der C_t-Gehalte und C/N-Verhältnisse von 1962 bis 1990 (n = 4).
 Table II. Development of the total C-amounts and the C/N ratios from 1962 – 1990 (n = 4).

Tiefenstufe (cm)	Variante	C _t -Gehalte (%)									C/N-Verhältnisse								
		23.07. 1962	30.01. 1968	23.03. 1970	05.01. 1972	09.10. 1975	15.08. 1977	10.04. 1985	09.10. 1989	06.08. 1990	23.07. 1962	30.01. 1968	23.03. 1970	05.01. 1972	09.10. 1975	15.08. 1977	10.04. 1985	09.10. 1989	06.08. 1990
5 – 15	V 1	6,52	6,04	6,74	5,72	4,28	4,20	5,90	6,80	5,03	23,0	24,6	22,8	24,2	20,6	19,4	26,8	30,2	26,0
	V 2	6,70	4,72	5,64	6,14	3,95	4,04	4,65	5,34	4,38	22,3	25,9	32,8	33,9	27,2	20,5	26,2	29,6	28,1
	V 3	5,76	4,86	6,34	4,10	3,29	2,58	4,18	5,22	4,29	25,0	25,0	31,4	22,5	22,2	17,1	25,7	29,5	27,5
	V 4	4,45	3,53	4,64	4,50	3,05	1,92	4,14	5,20	3,87	22,5	17,2	26,8	25,0	17,8	16,8	25,9	26,5	22,5
	\bar{x}	6,82	4,20	5,29	5,05	3,59	3,70	4,78	5,80	4,36	32,5	18,3	29,4	25,8	20,6	16,7	27,7	28,9	35,0
25 – 35	V 1	5,36	4,92	3,05	4,30	2,99	3,53	5,48	5,49	4,42	24,0	28,1	22,8	30,9	22,3	29,9	39,1	42,2	43,7
	V 2	5,18	3,80	3,57	3,67	2,64	3,12	4,29	2,97	3,09	24,9	34,2	33,1	29,1	22,8	20,0	42,9	36,0	30,0
	V 3	5,32	3,49	3,84	3,45	1,84	1,75	3,30	4,16	3,58	27,3	28,6	40,0	28,8	24,9	19,2	28,1	40,8	27,8
	V 4	2,76	2,82	3,17	2,37	1,85	2,62	4,41	4,04	3,30	25,1	25,6	34,8	32,9	19,3	19,8	38,3	34,3	35,1
	\bar{x}	4,98	3,06	3,22	3,57	2,02	2,50	3,42	3,06	3,05	33,2	26,6	33,2	39,7	20,4	20,8	35,1	30,9	35,7
55 – 65	V 1	4,72	3,62	3,37	3,47	2,27	2,70	4,18	3,94	3,49	26,9	28,6	32,8	32,3	21,9	21,9	36,7	36,8	34,5
	V 2	5,25	-	3,35	3,70	3,46	4,01	5,20	6,10	5,00	28,4	-	29,4	38,1	26,0	24,0	39,2	44,2	56,9
	V 3	5,15	-	1,55	3,03	2,24	3,11	4,07	2,65	2,95	27,8	-	22,5	38,4	22,9	24,5	32,6	35,6	42,4
	V 4	3,79	-	4,44	2,52	1,79	2,14	3,54	3,89	2,87	26,5	-	42,3	37,6	26,3	26,8	39,3	38,8	42,6
	\bar{x}	3,50	-	3,25	2,45	1,28	2,28	3,77	3,56	4,66	29,2	-	45,1	36,6	26,1	25,3	38,7	36,6	41,6
	V 5	4,61	-	2,71	2,99	2,31	2,48	4,32	4,19	3,80	34,1	-	35,7	41,0	26,9	22,5	41,1	41,5	35,7
	\bar{x}	4,46	-	3,06	2,94	2,22	2,80	4,18	4,08	3,86	29,2	-	35,0	38,3	25,6	24,6	38,0	39,3	43,8

Tabelle III. C_T - und N_T -Gehalte sowie C/N-Verhältnisse vom 12.05.1998 (n = 4).
 Table III. Total C and N as well as C/N ratios from 12.05.1998 (n = 4).

Tiefenstufe (cm)	Variante					\bar{x}	GD 5%
	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5		
	C_T -Gehalte (%)						
5–15	7,88	6,68	6,58	5,84	6,34	6,66	2,25
25–35	7,51	5,99	6,34	6,04	5,89	6,36	2,25
55–65	7,32	5,66	5,75	5,68	5,78	6,04	1,75
150–160	8,82	6,36	6,04	6,99	7,52	7,15	3,15
\bar{x}	7,88	6,17	6,18	6,14	6,38	6,55	1,07
GD 5%	1,83	2,35	3,09	2,72	1,82	1,01	-
	N_T -Gehalte (‰)						
5–15	2,88	2,08	2,28	1,90	2,10	2,24	0,586
25–35	2,48	1,92	2,15	1,88	1,98	2,08	0,682
55–65	2,25	1,60	1,72	1,62	1,70	1,78	0,519
150–160	1,88	1,45	1,30	1,52	1,60	1,55	0,667
\bar{x}	2,37	1,76	1,86	1,73	1,84	1,91	0,331
GD 5%	0,410	0,684	0,711	0,712	0,582	0,281	-
	C/N-Verhältnisse						
5–15	27,4	32,0	29,0	30,5	30,1	29,8	4,42
25–35	30,4	31,2	29,2	31,9	30,1	30,6	3,14
55–65	32,7	35,4	33,4	34,9	34,2	34,1	2,80
150–160	46,8	44,4	46,2	46,2	46,7	46,1	3,53
\bar{x}	34,3	35,7	34,4	35,9	35,3	35,1	0,47
GD 5%	3,92	3,71	3,52	3,52	3,00	4,21	-

abbaubaren organischen Substanzen bevorzugt mineralisiert worden. Das nachfolgend angebaute Dauergrünland (1966 - 1970) bewirkte einen Anstieg der C_T -Gehalte in der Ackerkrume. Der Nachbau mit Kartoffel (1971), Luzerne (1972 - 1975), Kartoffel (1976) und Winterweizen (1977) hatte abnehmende Humusvorräte zur Folge, was im Hinblick auf die C-Dynamik des Kippenbodens unter Luzerne (09.10.1975) doch einigermaßen überrascht. Möglicherweise ist das ein Indiz für die allmähliche Herausbildung eines neuen Gleichgewichtes zwischen Humusgehalt des Kippenbodens sowie Anlieferung und Abbau der organischen Bodensubstanz, das an die derzeitigen und gegenüber den Bildungsbedingungen der kohlehaltigen tertiären Sedimente veränderten Umweltbedingungen angepasst ist. Nach der Ganzpflanzenernte von Hirse (1984) und dem erneuten Anbau von Luzerne (1985 - 1988) stiegen die C_T -Gehalte bis 1989 wieder an. Der Nachbau mit Kartoffel (1989) und Winterroggen (1990) führte erst 1990 zu einer Verringerung der Humusvorräte. Nach dem erneuten Anbau von Luzerne (1993 - 1997) und Silomais (1998) waren die C_T -Gehalte in der Ackerkrume und in den tieferen Bodenschichten wieder angestiegen (Tabelle III).

Die varianzanalytische Auswertung der C_T -Gehalte von 1998 ergab jedoch keine statistisch gesicherten Differenzen zwischen den Meliorationsvarianten innerhalb derselben Tiefenstufe sowie zwischen den Tiefenstufen der Varianten. Das ist offensichtlich eine zeitlich begrenzte Besonderheit der landwirtschaftlich genutzten stark kohlehaltigen Kippenböden, die dadurch gekennzeichnet ist, dass zwischen den C_T -Gehalten der Ackerkrume und den tieferen Bodenschichten keine signifikanten Unterschiede bestehen. Dennoch ist die Tendenz zur Herausbildung eines humusreichen Ap-Horizontes erkennbar.

Mit der Verringerung der C_T -Gehalte werden die C/N-Verhältnisse bis 1977 enger (vgl. Tabelle II). Da der überwiegende Teil des Bodenstickstoffs in organischer Bindung (Huminstoffe, mikrobielle Biomasse, Vegetationsrückstände, abgestorbene Organismen)

vorliegt, müssen zwischenzeitlich N-reichere Humusstoffe als die kohligen Beimengungen in den Ausgangssubstraten entstanden und angereichert worden sein. Das sind vornehmlich die N-reicheren rezenten Streustoffe und Huminstoffe sowie die möglicherweise durch Humifizierung der Lignine und ligninartigen Beimengungen der Kohle neu gebildeten Huminstoffe. Jedoch überwiegt in den ersten Jahren nach der Grundmelioration die Mineralisierung der organischen Substanz bis sich ein unter den gegebenen Klima- und Reaktionsbedingungen erreichbares Gleichgewicht zwischen Zufuhr und Zersetzung, Ab- und Umbau der organischen Komponenten einstellt. Ein solcher Gleichgewichtszustand dürfte annähernd zwischen 1975 und 1977 erreicht sein. Danach stellt sich ein neues Gleichgewicht ein, das vermutlich stärker von den Akkumulations- sowie Ab- und Umbauprozessen der rezenten organischen Substanzen unter Einbeziehung der fossilen Humusstoffe bestimmt ist. Da unter Luzerne die Humusakkumulation überwiegt, werden die C/N-Verhältnisse ab 1985 infolge des höheren Massenanteils von Nichthuminstoffen (Streustoffe) am Bodenhumus wieder weiter. Die varianzanalytische Auswertung der C/N-Verhältnisse von 1998 ergibt mit Ausnahme von V 2 keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten innerhalb derselben Tiefenstufe. Allerdings werden mit zunehmender Bodentiefe die C/N-Verhältnisse signifikant weiter, ohne jedoch die Ausgangswerte von > 60 zu erreichen.

Neben den C/N-Verhältnissen ist der Farbquotient der Huminsäuren (Welte 1956) ein weiteres Merkmal zur Kennzeichnung der Humusqualität (Tabelle IV). Dabei lassen $Q_{4/6}$ -Werte von $< 4,0$ auf den Grauhuminsäuretyp und solche von $> 4,0$ auf den Braunhuminsäuretyp schließen (Wünsche 1977).

Beachtenswert ist, dass bei allen Varianten und in allen Tiefenstufen die Farbquotienten deutlich unter den Vergleichswerten von 1958 ($Q_{4/6} = 5,37$) und 1968 ($Q_{4/6} = 5,2$ bis $5,6$) liegen und damit der Aufbau N-reicher Grauhuminsäuren belegt ist. Die Grauhuminsäureanteile sind bei den Varianten V 2 und V 5 bis zur Tiefenstufe 55 - 65 cm signifikant höher als bei der Vergleichsvarianten V 1, d.h., die über mehrere Jahrzehnte andauernde nachhaltige Verbesserung der Aciditätsverhältnisse hat die mikrobiell gesteuerte Synthese N-reicher Grauhuminsäuren gefördert. Da die Kohlehuminstoffe in den landwirtschaftlich genutzten Kohlelehmsanden dominieren, könnten die N-reicheren Huminsäuren unter anderem durch N-Modifizierung der fossilen Huminstoffe und ihrer Zersetzungsprodukte unter Beibehaltung ihrer chemischen Grundstrukturen entstanden sein.

Der Versorgungsgrad der Böden mit umsetzbarer organischer Substanz wird durch den heißwasserlöslichen Kohlenstoff (C_{hwl}) ausreichend genau erfasst (Körschens et al. 1990, Ghani et al. 2003, Behm 1988, Landgraf et al. 2003). Der C_{hwl} -Gehalt spiegelt die am leichtesten umsetzbare Komponente der umsetzbaren Kohlenstoff-(Humus-)Menge wider und beinhaltet neben den einfachen organischen Verbindungen auch die mikrobielle

Tabelle IV. $Q_{4/6}$ -Werte vom 12.05.1998 ($n = 4$)
Table IV. $Q_{4/6}$ -Parameter from 12.05.1998 ($n = 4$).

Tiefenstufe (cm)	Variante					\bar{x}	GD 5%
	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5		
5 - 15	4,60	3,85	4,65	4,80	4,15	4,41	0,36
25 - 35	4,68	3,72	4,68	4,75	4,12	4,39	0,43
55 - 65	4,70	4,25	4,70	4,85	4,22	4,59	0,42
150 - 160	4,72	4,45	4,70	4,72	4,60	4,64	0,38
\bar{x}	4,68	4,07	4,68	4,78	4,27	4,50	0,20
GD 5 %	0,45	0,47	0,44	0,20	0,42	0,24	-

Biomasse. Als OS-Verarmungsgrenze wird ein C_{hwl} -Gehalt von < 20 mg C/100 g Boden angegeben (Schulz 1990). Die C_{hwl} -Gehalte von 1998 liegen bis in 160 cm Bodentiefe bei ≥ 675 mg/100 g Boden und deuten auf eine OS-Übersorgung hin (vgl. Tabelle V). Die sehr hohen C_{hwl} -Bodenvorräte entstehen vor allem durch den oxidativen (Aerationszone) und/oder reduktiven Abbau (anaerobe Zone) der kohligen Beimengungen, belegt durch die sehr hohen DOC-Frachten der Sickerwässer bis zu 1.000 mg/l und die hohen CO_2 -Gehalte der Grundluft. Dabei werden wasserlösliche organische Verbindungen, vorwiegend aromatische Mono- bis Polycarbonsäuren sowie aliphatische Dicarbonsäuren, freigesetzt (Herzschuh et al. 1998). Da offensichtlich in den ackerbaulich genutzten Kohlelehmsanden die rezenten Streustoffe nahezu vollständig mineralisiert werden, bleibt die Dominanz der Kohlehuminstoffe über mehrere Jahrzehnte erhalten. Das zeigt sich auch in der geringen Tiefendifferenziertheit der C_{hwl} -Gehalte (Tabelle V).

Die Korrelation zwischen C_{hwl} (y) und C_{t} (x) ergibt für die Ackerkrume keine und für alle darunterliegenden Bodenschichten statistisch gesicherte Beziehungen (vgl. Tabelle VI). Die organische Substanz besteht in der oberen Bodenschicht zu größeren Massenanteilen aus rezenten Bildungen, deren Beiträge zu den C_{hwl} -Bodenvorräten infolge stärkerer Mineralisation geringer sind als die der kohligen Beimengungen. Da der Bodenstickstoff vorwiegend in organischer Bindung vorliegt, sind die Beziehungen zwischen den N_{t} - und C_{t} -Gehalten in allen Bodenschichten sehr eng.

Diese Beziehungen werden mit zunehmender Bodentiefe enger, obwohl die N_{t} -Gehalte abnehmen. Darin zeigt sich der dominante Einfluss der fossilen Humussubstanz auf die N_{t} -Bodenvorräte. Das N-Nachlieferungsvermögen (N_{hwl} , N_{min}) steht wiederum in Beziehung zum N_{t} -Gehalt (Tabelle VI). Diese Abhängigkeiten sind in der Ackerkrume signifikant und bestätigen den bedeutenden Einfluss der rezenten organischen Substanzen auf die N-

Tabelle V. Heißwasserlösliche Kohlenstoff- (C_{hwl}) und Stickstoffgehalte (N_{hwl}) der Versuchsböden vom 12.05.1998 (n = 4).

Table V. Hot water soluble C and N amounts of the trial soils from 12.05.1998 (n = 4).

Tiefenstufe (cm)	Variante					\bar{x}	GD 5%
	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5		
	C_{hwl} -Gehalte (g/kg FB)						
5–15	10,28	7,85	7,02	8,15	7,72	8,20	2,56
25–35	9,28	7,32	7,52	7,48	8,38	8,00	2,42
55–65	9,98	7,25	6,92	7,98	7,90	8,01	2,38
150–160	10,10	8,68	6,75	8,65	9,22	8,68	2,72
\bar{x}	9,91	7,78	7,05	8,06	8,30	8,22	1,11
GD 5%	2,78	1,81	3,38	1,84	2,74	1,14	-
	N_{hwl} -Gehalte (mg/kg FB)						
5–15	7,18	4,65	5,90	3,18	2,75	4,73	2,26
25–35	7,45	5,30	4,98	3,50	3,38	4,92	2,23
55–65	6,70	4,05	4,60	2,72	3,38	4,29	1,57
150–160	5,58	3,70	4,08	2,95	3,28	3,92	1,85
\bar{x}	6,73	4,42	4,89	3,09	3,20	4,46	0,92
GD 5%	3,46	1,72	1,63	0,86	1,54	1,16	-
	$C_{\text{hwl}}/N_{\text{hwl}}$ -Verhältnisse						
5–15	1432	1688	1190	2563	2807	1936	-
25–35	1246	1381	1510	2137	2479	1751	-
55–65	1490	1790	1504	2934	2337	2011	-
150–160	1810	2346	1654	2932	2811	2311	-
\bar{x}	1494	1801	1464	2642	2608	2002	-

Tabelle VI. Korrelationen zwischen C_{hwl} , N_{t} , N_{hwl} und N_{min} als abhängige (y) und C_{t} , N_{t} und N_{hwl} als unabhängige Variable (x) für die untersuchten Tiefenstufen vom 12.05.98.

Table VI. Correlation between hot water soluble C, N, total N and Nmin as dependent (y) and total C, total N and hot water soluble N as independent parameters (x) concerning the investigated soil depths.

Abhängige (y) Variable	Unabhängige (x) Variable	Tiefenstufe (cm)	Formel	n	B	r^*	\bar{y}	\bar{x}
C_{hwl} (g/kg FB)	C_{t} (%)	a = 5 – 15	$y = 5,745 + 0,369 x$	20	0,086	0,293	8,20	6,66
		b = 25 – 35	$y = 4,42 + 0,562 x$	20	0,259	0,509*	8,00	6,36
		c = 55 – 65	$y = 2,548 + 0,904 x$	20	0,387	0,622*	8,01	6,04
		d = 150 – 160	$y = 5,436 + 0,454 x$	20	0,240	0,490*	8,68	7,15
N_{t} (%)	C_{t} (%)	a – d	$y = 4,745 + 0,531 x$	80	0,230	0,480*	8,22	6,55
		a = 5 – 15	$y = 0,034 + 0,0286 x$	20	0,771	0,878*	0,224	6,66
		b = 25 – 35	$y = 0,018 + 0,030 x$	20	0,907	0,952*	0,208	6,36
		c = 55 – 65	$y = -7,66^{-03} + 0,0307 x$	20	0,918	0,958*	0,178	6,04
N_{min} (mg/100 g FB)	N_{t} (%)	d = 150 – 160	$y = 8,86^{-03} + 0,0204 x$	20	0,963	0,981*	0,155	7,15
		a – d	$y = 0,043 + 0,0227 x$	80	0,516	0,718*	0,191	6,55
		a = 5 – 15	$y = 1,28 + 2,801 x$	20	0,198	0,445*	1,907	0,224
		b = 25 – 35	$y = 1,363 + 2,976 x$	20	0,155	0,393	1,982	0,208
N_{hwl} (mg/100 g FB)	N_{t} (%)	c = 55 – 65	$y = 0,912 + 7,387 x$	20	0,349	0,591*	2,228	0,178
		d = 150 – 160	$y = 0,537 + 19,568 x$	20	0,429	0,654*	3,570	0,155
		a – d	$y = 2,50 - 0,417 x$	80	4,84 ⁻⁰⁴	-0,022	2,422	0,191
		a = 5 – 15	$y = -0,083 + 2,478 x$	20	0,312	0,559*	0,473	0,224
N_{min} (mg/100 g B)	N_{hwl} (mg/100 g B)	b = 25 – 35	$y = 0,116 + 1,805 x$	20	0,174	0,417	0,492	0,208
		c = 55 – 65	$y = -7,86^{-03} + 2,454 x$	20	0,331	0,575*	0,429	0,178
		d = 150 – 160	$y = 0,192 + 1,288 x$	20	0,154	0,393	0,392	0,155
		a – d	$y = 0,097 + 1,824 x$	80	0,258	0,508*	0,446	0,191
N_{hwl} (mg/100 g B)	C_{hwl} (g/kg B)	a = 5 – 15	$y = 1,578 + 0,694 x$	20	0,239	0,489*	1,907	0,473
		b = 25 – 35	$y = 1,576 + 0,825 x$	20	0,223	0,472*	1,982	0,492
		c = 55 – 65	$y = 1,719 + 1,185 x$	20	0,164	0,404	2,228	0,429
		d = 150 – 160	$y = 1,644 + 4,919 x$	20	0,289	0,537*	3,570	0,392
N_{hwl} (mg/100 g B)	C_{hwl} (g/kg B)	a – d	$y = 2,10 + 0,721 x$	80	0,018	0,134	2,422	0,446
		a = 5 – 15	$y = 0,278 + 0,024 x$	20	0,043	0,207	0,473	8,20
		b = 25 – 35	$y = 0,327 + 0,021 x$	20	0,028	0,167	0,492	8,00
		c = 55 – 65	$y = 0,125 + 0,038 x$	20	0,163	0,403	0,429	8,01
N_{hwl} (mg/100 g B)	C_{hwl} (g/kg B)	d = 150 – 160	$y = 0,109 + 0,032 x$	20	0,197	0,444*	0,392	8,68
		a – d	$y = 0,233 + 0,026 x$	80	0,064	0,253*	0,446	8,22

* $p < 0,05$

Freisetzungsrates. Wesentlich ist, dass in der untersten Bodenschicht (anaeroben Zone) die Beziehungen N_{\min}/N_{hwl} , N_{\min}/N_t und $N_{\text{hwl}}/C_{\text{hwl}}$ stets statistisch gesichert sind, d.h., auch in der untersten Bodenschicht erfolgt eine N-Freisetzung durch Abbau der organischen Substanz. Andererseits nehmen die N_{\min} -Gehalte mit der Bodentiefe zu, was zum einen auf die sickerwassergebundene NO_3 -Tiefenverlagerung sowie die Reduktion von $\text{NO}_3\text{-N}$ zu $\text{NH}_4\text{-N}$ und zum anderen auf die N-Mineralisierung zurückzuführen ist (vgl. Tabelle VIII).

Die $C_{\text{hwl}}/N_{\text{hwl}}$ -Verhältnisse sind mit durchschnittlich rund 2000 extrem weit und bestätigen, dass vorwiegend heißwasserlösliche N-freie und N-arme, niedermolekulare organische Verbindungen freigesetzt werden (Tabelle V). Die N-reicheren Huminstoffe sind offensichtlich heißwasserunlösliche Polymere, die überwiegend aus den Zersetzungsprodukten der kohligen Beimengungen synthetisiert werden.

Die Entwicklung der mittleren C/P-Verhältnisse in den einzelnen Tiefenstufen zeigt, dass bereits die Abwasserlandbehandlung zu einer starken P-Anreicherung in der Ackerkrume und durch P-Verlagerung bis in 65 cm Bodentiefe geführt hat (vgl. Tabelle VII). Der C/P-Quotient von < 100 deutet an, dass die Phosphatadsorption durch komplex gebundenes Fe^{3+} und Al^{3+} in den kohlehaltigen Kippenböden besonders stark ausgeprägt ist.

3.2. Nährstoffverhältnisse

3.2.1. Stickstoff. Die N_t -Gehalte des Kippenbodens sind im Verlaufe von 40 Jahren in der Ackerkrume von 0,88 ‰ auf durchschnittlich 2,24 ‰ angehoben worden und liegen nunmehr im Bereich landwirtschaftlich genutzter Altstandorte (Tabelle III). Die N_t -Gehalte nehmen im Versuchsmittel mit der Bodentiefe signifikant ab und liegen selbst noch in 160 cm Bodentiefe bei 1,55 ‰. Beachtenswert ist, dass bei der Variante mit den niedrigsten pH-Werten die höchsten N_t - (und C_t -) Gehalte bestimmt wurden (V 1). Vermutlich hängt das mit einer stärkeren N-Immobilisation und/oder geringeren N-Mineralisation der OS zusammen.

Die N_{\min} -Gehalte vom 12.05.1998 lagen nach Luzerneumbruch in der oberen Bodenschicht bei durchschnittlich 1,90 mg/100 g FB und stiegen bis in 65 cm Bodentiefe auf 2,22 mg/100 g FB an (Tabelle VIII). Das entspricht einem sehr beachtlichen N_{\min} -Bodenvorrat von rund $150 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ ($d_B = \emptyset 1,2 \text{ g} \cdot \text{ccm}^{-1}$). Die NH_4^+ -N-Anteile nehmen im Versuchsmittel mit der Bodentiefe zu und sind in 150 - 160 cm Bodentiefe mit 2,88 mg/100 g FB statistisch gesichert höher als in den darüberliegenden Bodenschichten.

Tabelle VII. Entwicklung der C/P-Verhältnisse* (n = 5).

Table VII. Development of the C/P-ratios* (n = 5).

Datum der Probenentnahme	Tiefenstufe (cm)			
	5–15	25–35	55–65	150–180
09.10.1958**	860	–	1.080	–
31.08.1963	97	–	–	–
30.01.1968	73	–	–	–
23.03.1970	122	152	305	–
05.01.1972	85	116	245	–
09.10.1975	60	78	117	–
15.08.1977	64	104	122	–
10.04.1985	57	120	176	–
12.05.1998	80	91	134	662

*P im 10 %igen HCl-Auszug

**vor Versuchsbeginn

Tabelle VIII. NH_4^+ -N, NO_3^- -N und N_{min} -Gehalte vom 12.05.1998 (n = 4).
 Table VIII. NH_4^+ -N, NO_3^- -N and N_{min} -amounts from 12.05.1998 (n = 4).

Tiefenstufe (cm)	Variante					\bar{x}	GD 5%
	V 1	V 2	V 3	V 4	V 5		
	NH_4^+ -N (mg/100 g FB)						
5–15	0,36	0,28	0,26	0,39	0,23	0,30	0,15
25–35	0,52	0,24	0,29	0,58	0,28	0,38	0,30
55–65	0,96	0,40	0,56	0,66	0,38	0,59	0,26
150–160	3,57	2,68	2,22	2,13	3,78	2,88	1,60
\bar{x}	1,35	0,90	0,83	0,94	1,17	1,04	0,88
GD 5%	0,91	0,52	1,02	0,52	1,08	0,39	–
	NO_3^- -N (mg/100 g FB)						
5–15	1,82	1,40	1,71	1,40	1,68	1,60	0,40
25–35	1,78	1,70	1,70	1,08	1,74	1,60	0,14
55–65	1,73	1,51	1,76	1,19	1,98	1,63	0,68
150–160	0,66	0,70	0,65	0,50	0,96	0,69	0,25
\bar{x}	1,50	1,33	1,46	1,04	1,59	1,38	0,36
GD 5%	0,79	0,37	0,40	0,32	0,40	0,23	–
	N_{min} (mg/100 g FB)						
5–15	2,18	1,68	1,97	1,79	1,91	1,90	0,43
25–35	2,30	1,94	1,99	1,66	2,02	1,98	0,48
55–65	2,69	1,91	2,32	1,85	2,36	2,22	0,63
150–160	4,23	3,38	2,87	2,63	4,74	3,57	1,74
\bar{x}	2,85	2,23	2,29	1,98	2,76	2,42	0,68
GD 5%	1,09	0,68	1,24	0,69	1,18	0,47	–

Die NO_3^- -N-Anteile weisen aufgrund zunehmend anaerober Verhältnisse eine gegenläufige Tendenz auf. Die Auswirkungen der Meliorationsvarianten auf die N_{min} -Gehalte der beprobten Bodenschichten sind anscheinend trotz signifikanter Reaktionsunterschiede vergleichsweise gering. Eine Ursache könnte das insgesamt weite C/N-Verhältnis sein, so dass nach Luzerneumbruch neben der N-Mineralisierung gleichzeitig eine hohe N-Immobilisierung stattfindet. Andererseits bewirken pH-Werte von $> 5,5$ eine höhere N-Mineralisierungsrate und stärkere Umwandlung von NH_4^+ -N zu NO_3^- -N als pH-Werte von $\leq 5,0$, so dass die höheren NO_3^- -N-Gehalte bei V 5 in 55 - 65 und 150 - 160 cm Tiefe ein Indiz für die vergleichsweise stärkere N-Mineralisation und höhere Nitrifikationsrate sind.

3.2.2. *Phosphor*. Die P_t -Bodenvorräte liegen bis in 65 cm Bodentiefe deutlich über den Ausgangswerten von 1958 (Tabelle IX). Die P_t -Gehalte sind im Oberboden am höchsten und nehmen mit der Bodentiefe ab. Die vergleichsweise hohen P_t -Gehalte von durchschnittlich 0,45 ‰ in der Tiefenstufe 55 - 65 cm lassen vermuten, dass die P-Verlagerung durch einen hohen P-Anteil der Bodenlösung in organischer Bindung begünstigt wird.

Die pflanzenverfügbaren P-Gehalte sind im Oberboden der Gehaltsklasse D (8,1 - 12 mg P_{DL} /100 g FB) zuzuordnen (Tabelle IX), so dass nur noch eine zum Pflanzenentzug reduzierte P-Düngung notwendig ist (Autorenkollektiv 2000). Die zwischen den Varianten bestehenden Differenzierungen können auf das pH-abhängige Lösungsverhalten der verschiedenen anorganischen P-Verbindungen und auf die im Laufe der Zeit abnehmende Löslichkeit des adsorbierten Phosphats sowie der Neubildungen aus Düngephosphaten zurückgeführt werden (Scheffer/Schachtschabel 1989). Beispielsweise steigt die Löslichkeit der Calciumphosphate mit abnehmender OH^- und Ca^{2+} -Konzentration der Bodenlösung (vgl. V 2 und V 5 mit V 1). Außerdem nimmt mit abnehmendem pH-Wert der Anteil des an Fe^{3+} - und Al^{3+} -Oxiden/

Tabelle IX. Mittlere Mg-, K- und P-Gehalte im 10%-igen HCL-Auszug sowie die pflanzenverfügbaren Mg-, K- und Bodenvorräte vom 12.05.1998 (n = 4).

Table IX. Average Mg-, K- and P-amounts in 10% HCL-solution as well as the plant available amounts of Mg-, and K from 12.05.1998 (n = 4).

Tiefenstufe (cm)	Variante	10 %iger HCl-Auszug			Pflanzenverfügbare Nährstoffe (mg/100 g FB)		
		Mg _t (‰)	K _t (‰)	P _t (‰)	Mg _{CaCl2}	K _{DL}	P _{DL}
5-15	V 1	1,2	0,59	0,96	32,2	6,4	12,2
	V 2	1,7	0,34	0,74	24,0	3,9	10,2
	V 3	1,1	0,48	0,82	37,5	5,5	13,5
	V 4	1,0	0,63	0,77	36,0	3,9	9,6
	V 5	2,3	0,47	0,89	26,5	3,9	8,8
	\bar{x}	1,46	0,50	0,84	31,2	4,7	10,9
	GD 5%	-	-	-	14,33	1,36	1,70
25-35	V 1	1,0	0,54	0,78	28,8	7,0	10,1
	V 2	1,5	0,36	0,59	22,2	4,4	9,2
	V 3	0,95	0,53	0,79	32,5	5,4	11,2
	V 4	1,0	0,48	0,60	33,8	4,4	9,3
	V 5	1,5	0,46	0,73	25,0	4,8	7,3
	\bar{x}	1,19	0,47	0,70	28,5	5,2	9,4
	DG 5%	-	-	-	15,94	2,52	2,98
55-65	V 1	0,76	0,52	0,61	24,8	7,0	7,2
	V 2	0,84	0,47	0,41	15,2	2,9	6,1
	V 3	0,83	0,38	0,40	23,0	5,8	6,3
	V 4	0,61	0,49	0,37	24,5	3,5	5,3
	V 5	1,20	0,40	0,46	20,0	3,7	5,8
	\bar{x}	0,85	0,45	0,45	21,5	4,6	6,1
	GD 5%	-	-	-	9,96	1,89	2,11
150-160	V 1	0,26	0,53	0,12	5,2	5,2	1,9
	V 2	0,33	0,58	0,11	5,2	2,0	1,8
	V 3	0,26	0,46	0,11	4,9	3,4	1,4
	V 4	0,28	0,43	0,09	5,5	2,6	1,2
	V 5	0,35	0,45	0,11	6,7	2,7	1,5
	\bar{x}	0,30	0,49	0,11	5,3	3,2	1,6
	GD 5%	-	-	-	1,72	1,29	0,71
0-30*		0,05	0,12	0,10	n.b.**	< 1,0	< 1,0
30-100 *		0,05	0,12	0,16			

*vor Versuchsbeginn

Hydroxiden sowie organischen Fe-/Al-Komplexen adsorbierten Phosphats zu. Dies und die Umwandlung von Ca-Phosphaten in Ca-reichere, besser kristallisierte Phosphate erklären möglicherweise die geringeren P_{DL}-Gehalte bei V 5 zu V 2 bzw. bei V 2 und V 5 zu V 1 und V 3. Bei V 1 und V 3 sind die P_{DL}-Vorräte wiederum höher als bei V 4, was den positiven Einfluss der Stallungsgaben von 1988 und 1991 auf die P-Dynamik belegt.

Die Entwicklung der P_{DL}-Gehalte bei V 1 und V 5 in 5 - 15 cm zeigt, dass bereits ab 1963 die mit der P-Düngung anzustrebende Gehaltsklasse C (5,6 - 8,0 mg P_{DL}/100 g FB) stabil erreicht wird und danach nur noch eine auf den Pflanzenentzug abgestimmte P-Mineraldüngung erforderlich ist (vgl. Tabelle X).

Die hohe Phosphatpufferung führt jedoch bei Einstellung der P-Düngung, wie in den Jahren von 1986 bis 1988 unter Luzerne praktiziert, zu einer starken Abnahme der P_{DL}-Gehalte in der Tiefenstufe 25 - 35 cm. Auffällig sind die im Vergleich zu V 1 niedrigeren P_{DL}-Gehalte bei V 5. Ursache sind die mit den Braunkohlenaschen zugeführten Fe(III)- und

Tabelle X. Entwicklung der P_{DL}-, K_{DL}- und Mg_{CaCl2}-Gehalte (mg/100 g FB) von 1962 bis 1990 am Beispiel der Meliorationsvarianten V 1 (Kalkmelioration) und V 5 (Aschemelioration), n = 4.

Table X. Development of P_{DL}-, K_{DL}- and Mg_{CaCl2}-amounts (mg/100 g FB) from 1962 to 1990 on the example of the amelioration variants V 1 (lime) and V 5 (ash), n = 4.

Tag der Probenentnahme	Tiefenstufe (cm)											
	5–15						25–30					
	P _{DL}		K _{DL}		Mg _{CaCl2}		P _{DL}		K _{DL}		Mg _{CaCl2}	
	V 1	V 5	V 1	V 5	V 1	V 5	V 1	V 5	V 1	V 5	V 1	V 5
23.07.1962	4,6	5,1	24,4	27,4	–*	–	2,7	1,8	26,6	18,7	–	–
31.08.1963	8,9	7,0	4,4	1,7	–	–	2,4	1,3	4,6	1,0	–	–
19.05.1965	6,5	6,5	3,3	3,3	4,1	9,1	1,7	1,3	6,6	4,2	4,9	9,0
23.03.1970	5,6	4,4	1,0	0,8	6,3	10,2	–	–	–	–	–	–
05.01.1972	8,0	5,8	6,8	5,5	6,8	11,0	5,8	2,4	4,5	3,0	6,8	13,4
09.10.1975	10,1	7,2	2,2	2,5	6,0	11,4	7,3	2,7	2,7	2,0	4,4	9,0
15.08.1977	7,0	5,2	3,0	3,2	5,4	12,4	4,4	3,1	3,0	2,8	5,8	12,9
10.08.1982	9,2	8,2	7,5	6,8	6,5	10,7	–	–	–	–	–	–
10.04.1985	8,3	6,1	5,2	5,0	5,7	9,3	4,0	4,2	3,8	2,0	6,1	9,8
09.10.1989	5,5	5,3	15,7	20,4	9,2	13,8	0,7	0,3	7,6	2,0	5,2	5,9
06.08.1990	8,9	5,8	18,0	10,3	26,8	16,0	2,4	1,8	8,2	1,0	0	6,8

* nicht bestimmt

Al(III)-Oxide sowie Fluorverbindungen, die die Anteile von adsorbiertem Phosphat und schwerlöslichem Fluorapatit am Bodenphosphat erhöht haben könnten. Nach 1989 steigen die P_{DL} -Gehalte aufgrund einer deutlich über den Pflanzenentzug liegenden P-Düngung von durchschnittlich $39,4 \text{ kg P} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ wieder an und erreichen 1998 ihren höchsten Wert (vgl. Tabelle IX und X).

3.2.3. Kalium. Die HCl-löslichen K-Vorräte sind von durchschnittlich 0,12 % vor Versuchsbeginn auf 0,34 % bis 0,63 % angestiegen (Tabelle IX). Sehr wahrscheinlich sind Mineralneubildungen aus den Verwitterungsprodukten der Silikate unter Einbau des freigesetzten bzw. zugeführten Kaliums. Die K_t -Gehalte liegen deutlich unter dem für unverritzte Standorte angegebenen Grenzbereich von $\geq 2,0$ %, so dass das K-Fixierungsvermögen der grundmeliorierten kohlehaltigen Kippenböden bei einer jährlichen K-Düngung von durchschnittlich $113 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ niedrig ist. Die geringe Tiefendifferenziertheit der K_t -Gehalte weist auf eine starke K-Tiefenverlagerung hin, die noch durch die hohe Ca-Selektivität der organischen Austauschere und die hohen Ca- und Mg-Konzentrationen der Bodenlösung bei V 2 und V 5 gefördert wird. Die Folgen sind vergleichsweise niedrigere K_t -Gehalte bei V 2 und V 5 bis in 35 cm Tiefe und der gegenüber den Ausgangswerten deutliche Anstieg der K_t -Gehalte in den tieferen Bodenschichten.

Die Gehalte an pflanzenverfügbarem Kalium sind nach der Abwasserlandbehandlung sehr hoch und nehmen bis 1965 aufgrund der bis dahin unterlassenen K-Mineraldüngung stark ab (vgl. Tabelle X). Dieser negative Trend wird nicht durch die von 1967 bis 1969 zu Gras applizierten K-Mineraldüngergaben von durchschnittlich $227 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ behoben, so dass die K_{DL} -Bodenvorräte am 23.03.1970 nur noch bei 0,8 (V 5) und 1,0 mg/100 g FB (V 1) liegen. Die weitere Entwicklung der K_{DL} -Gehalte zeigt, dass die mit der K-Düngung anzustrebende Gehaltsklasse von 8 bis 11 mg K/100 g FB nur erreicht wird, wenn über den Pflanzenentzug gedüngt wird. Andererseits nehmen die Pflanzen neben dem wasserlöslichen und austauschbar gebundenen Kalium auch nichtaustauschbar gebundenes Kalium auf, so dass hohe Pflanzenerträge auch bei K_{DL} -Gehalten von $< 8 \text{ mg/100 g FB}$ möglich sind. Beispielsweise beträgt der bei der ertragsstärksten Variante (V 5) über die Pflanzenerträge von 1963 bis 1998 kalkulatativ ermittelte K-Entzug rund $168 \text{ kg K} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, während die K-Zuführung nur mit rund $102 \text{ kg K} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$ anzugeben ist.

Die pflanzenverfügbaren K-Bodenvorräte von 1998 sind bei den Varianten mit den niedrigsten bodenmeliorativen CaO-Gaben von insgesamt 347 (V 1) bzw. 368 dt $\cdot \text{ha}^{-1}$ (V 3) bis in 160 cm Tiefe am höchsten (vgl. Tabelle IX). Eine Ursache könnte die zeitlich verzögerte Auflösung von Jarosit zu Fe(III)-Oxiden und K_2SO_4 sein, denn hier werden erst nach den Gesundungskalkungen von 1993 die dafür erforderlichen pH-Werte erreicht.

3.2.4. Magnesium. Die im 10 %igen HCl-Auszug bestimmten Mg_t -Gehalte sind durch die Verwendung von Braunkohlenasche als Kalkdüngemittel extrem stark von 0,05 % vor Versuchsbeginn bis auf 1,7 (V 2) und 2,3 % (V 5) in der Ackerkrume angehoben worden (Tabelle IX). Die Aschemelioration wirkt sich auch noch in der Tiefenstufe 150 - 160 cm positiv auf die Mg_t -Bodenvorräte aus. Im Versuchsmittel nehmen die Mg-Gesamtgehalte mit zunehmender Profiltiefe ab.

Die Bodenvorräte an pflanzenverfügbarem Mg (Mg_{PV}) werden durch die mit Kalkmergel ausgeführten Gesundungs- und Erhaltungskalkungen von 1988 und 1993 auf ein sehr hohes Niveau angehoben, so dass vorübergehend keine Mg-Düngungseffekte zu erwarten sind. Die Pflanzenverfügbarkeit der Mg-Gesamtverräte ist bei V 2 und V 5 mit durchschnittlich 15,3 % von Mg_t bis in 65 cm Bodentiefe deutlich niedriger als bei den Kalkdüngungsvarianten V 1, V 3 und V 4 mit durchschnittlich 32,7%.

Die in Tabelle X wiedergegebene Entwicklung der $Mg_{(CaCl_2)}$ -Gehalte lässt eine über mehrere Jahrzehnte lang deutlich bessere Mg-Versorgung der aschebehandelten Kippenböden erkennen. Die mit der Rekultivierung angestrebte Versorgungsstufe von 5,6 - 8,0 mg $Mg_{(CaCl_2)}/100$ g FB wird bereits bei bevorzugter Verwendung Mg-haltiger Düngemittel erreicht.

3.3. Entwicklung der Pflanzenerträge

Die Pflanzenerträge sind ein wichtiges Kriterium zur Kennzeichnung der Bodenfruchtbarkeit und in diesem Sinne ein Maß für das aktuelle Leistungsvermögen eines Bodens/Standortes in bezug auf die Biomasseproduktion. Die Eigenschaft des Bodens zur Erzeugung nutzbarer Pflanzenerträge ist keine statistische Größe, sondern spiegelt den Entwicklungsstand wider, den der Kippenboden unter dem Nutzungseinfluss bisher erreicht hat. Diese Entwicklung wird durch die Höhe der bodenmeliorativen CaO-Gabe und durch die Verwendung von Braunkohlenasche als Kalkdüngemittel entscheidend beeinflusst. Die Asche-Boden-Gemische sind ein gegenüber den Kipp-Substraten nachhaltig verändertes bodengeologisches Ausgangssubstrat.

Die Entwicklung der Pflanzenerträge ist in Tabelle XI am Beispiel der die Rekultivierungsfruchtfolgen in der Lausitz dominierenden Pflanzenarten und der Kartoffel wiedergegeben. Sie zeigt, dass bereits zu Beginn der Rekultivierung hohe Pflanzenerträge möglich sind und die höchsten Erträge bei V 5 erzielt werden.

Der kombinierte Einsatz von basenreicher Braunkohlenasche und Bioschlamm wirkte sich somit positiv auf die Ergebnisse der landwirtschaftlichen Rekultivierung aus. Durch die Abwasserlandbehandlung wurden nicht nur die Nährstoffverhältnisse, sondern auch die Aciditätsverhältnisse vorübergehend verbessert, was die vergleichsweise hohen **Futterrogenerträge** von 1963 bei V 1 und V 2 bestätigen. Danach nimmt der Einfluss der Abwasserlandbehandlung auf die Pflanzenerträge ab und die Vorteilswirkungen der aus der Säure-Basen-Bilanz (SBB) des Kippenbodens abgeleiteten CaO-Gabe (V 5) treten in der Fruchtfolge noch deutlicher hervor (Senf 1964). Im Folgejahr wird die physiologische Flachgründigkeit der Kippenböden insbesondere bei V 1 bis V 4 z.T. durch das höhere Niederschlagsangebot kompensiert, aber nicht aufgehoben, so dass die höchsten Futterrogenerträge auch 1965 bei V 5 ermittelt werden.

Die Gesundungskalkungen bei V 1 und V 3 sowie die Aschemelioration bei V 2 im Jahr 1965 haben beim erneut angebauten Futterroggen (1966) signifikant höhere FM-Erträge bewirkt als bei V 4. Die höchsten Futterrogenerträge werden auch in den Folgejahren bei den Meliorationsvarianten mit der höchsten meliorativen CaO-Gabe (V 2 und V 5) registriert.

Die **Luzerneerträge** zeigen in allen Jahren einen deutlichen Bezug zur Meliorationsvariante. Die jeweils höchsten FM-Jahreserträge werden bei V 5, gefolgt von V 2 ermittelt. Ertragsdifferenzierend wirken Jahresniederschläge und Niederschlagsverteilung in Verbindung mit der Mächtigkeit der durchwurzelbaren Bodenschicht. In den niederschlagsarmen Jahren (1985, 1986) und Winterhalbjahren (1972/73, 1995/96) sind die FM-Erträge von 1973, 1985 und 1996 bei V 5 signifikant höher als bei V 2, was in der besseren Durchwurzelbarkeit der tieferen Bodenschichten bei V 5 begründet ist.

Die **Silomaiserträge** von 1963 sind insgesamt wegen der Sommertrockenheit, fehlenden NPK-Mineraldüngung und des schlechten Kulturzustandes des Kippenbodens sehr niedrig. Gesundungskalkung (V 1, V 3) und Aschemelioration (V 2) von 1965 haben in Verbindung mit dem höheren Niederschlagsangebot und der seit 1966 praktizierten NPK-Mineraldüngung dazu geführt, dass die Silomaiserträge von 1978 bei allen Varianten höher waren als 1963. Die Gesundungs-/Erhaltungskalkungen von 1988 und 1993 (V 1 bis V 5) sowie 1998

Tabelle XI. Erträge ausgewählter Pflanzenarten.
Table XI. Yields of chosen plant species.

Variante	Putterroggen (dt · ha ⁻¹ FM)			Simpis alba (dt · ha ⁻¹ FM)	Luzerne (dt · ha ⁻¹) FM					Silomais (dt · ha ⁻¹ FM)				Kartoffel (dt · ha ⁻¹ FM)				W.-Roggen (dt · ha ⁻¹ Korn****)			W.-Gerste (dt · ha ⁻¹ Korn****)	
	15.05. 1963	18.05. 1965	06.05. 1966	08.09. 1964	1972*	1973**	1985*	1986**	1993**	1996***	26.08. 1963	17.10. 1978	25.08. 1998	28.08. 2000	„Amsel“ 1971	„Xenia“ 1976	„Adretta“ 1980	„Karpina“ 1989	23.07. 1990	30.07. 1991	26.07. 2001	30.06. 1999
V 1	264,2	172,5	211,7	3,2	102,1	249,3	125,3	162,8	456,4	322,2	138,5	285,2	620,0	210,4	308,8	226,6	235,6	121,2	45,6	44,7	43,4	43,8
V 2	255,0	183,9	245,0	10,4	205,6	449,1	229,4	286,4	459,6	265,4	146,8	350,4	709,6	222,7	289,6	242,8	267,7	86,2	44,9	42,3	48,7	46,6
V 3	281,7	205,4	189,4	17,8	115,6	265,4	109,4	154,2	423,6	332,5	158,3	263,1	678,9	191,6	326,8	214,9	216,9	105,1	45,2	46,8	47,6	46,5
V 4	307,2	184,6	127,9	14,7	79,9	137,7	77,8	92,9	390,0	259,0	165,6	244,0	664,4	183,3	282,1	187,7	201,6	95,8	45,1	44,2	43,5	43,5
V 5	341,0	249,7	242,1	120,3	207,5	508,8	286,0	353,2	492,2	444,6	202,7	383,6	751,1	215,6	320,4	256,9	261,0	120,3	47,9	49,4	54,8	53,9
\bar{x}	289,3	199,7	203,1	33,3	142,1	322,1	165,6	209,9	445,0	324,8	162,4	305,3	684,8	204,7	305,6	225,8	236,6	105,8	45,8	45,5	47,6	46,9
GD 5%	54,72	76,06	58,89	19,33	28,78	50,50	45,22	38,78	102,78	84,00	57,11	56,11	132,68	57,61	39,36	36,33	34,44	20,4	5,94	5,13	7,18	7,68
Jahresniederschläge (mm)																						
I. Quart.	50,5	134,1	91,4	46,4	44,7	77,4	110,0	121,7	114,4	28,4	50,5	71,8	112,4	189,5	55,5	137,2	80,2	75,2	89,4	63,0	140,9	131,1
II. Quart.	116,8	248,4	154,4	164,0	166,6	256,1	132,0	122,3	144,1	90,8	116,8	120,4	143,6	102,0	187,0	118,2	155,6	111,6	138,4	205,5	125,0	144,4
III. Quart.	133,0	182,3	153,9	209,7	169,4	170,4	63,9	127,1	271,5	175,4	133,0	314,1	243,5	150,2	92,9	77,6	228,5	93,1	131,8	51,0	211,5	140,1
IV. Quart.	149,5	116,2	181,2	128,7	66,4	143,9	106,3	183,0	133,0	71,4	149,5	144,3	141,2	99,3	130,4	110,0	150,0	167,0	129,5	116,0	133,7	110,1
Summe	449,8	681,0	581,0	548,8	447,1	647,8	412,2	554,1	663,0	366,0	449,8	650,6	640,7	541,0	465,8	443,0	614,3	446,9	489,1	435,5	611,1	525,7

* Ansaatjahr (2 Schnitte)

**1. Hauptnutzungsjahr (3 Schnitte)

***4. Hauptnutzungsjahr (3 Schnitte)

****86 % TS

(V 1, V 3, V 4) bewirkten einen weiteren Ertragsanstieg, wie ein Ertragsvergleich zwischen den niederschlagsreichen Jahren von 1978 und 1998 sowie zwischen den niederschlagsarmen Jahren von 1963 und 2000 zeigt.

Der Nachbau des Dauergrünlandes mit **Kartoffel** (1971) erbrachte gute Knollenerträge, wofür das hohe Niederschlagsangebot im Juni (121,9 mm) und die an den Pflanzenentzug angepasste Mineraldüngung (150 kg N, 22 kg P und 100 kg K pro ha) entscheidend waren. Die nach der Luzerne angebaute Kartoffel (1976) wurde wie 1971 gedüngt und erhielt eine Zusatzregengabe von 300 mm Klarwasser, so dass die Erträge bei V 2 und V 5 trotz der ungünstigen Niederschlagsverteilung annähernd den Erwartungen entsprachen. Vergleichbare Erträge wurden mit der Kartoffelsorte „Adretta“ (1980) bei einem höheren Jahresniederschlag und einer reduzierten N-Mineraldüngung (80 kg N, 35 kg P und 120 kg K pro ha) erzielt. Dagegen waren die Knollenerträge der mittelspäten Kartoffelsorte „Karpina“ (1989) nach Luzerneumbruch und bei einer gleichhohen NPK-Mineraldüngung deutlich niedriger, verursacht durch die sehr geringe Jahresniederschlagsmenge und die sehr ungünstige Niederschlagsverteilung. Die höchsten Kartoffelerträge weisen die Variante V 1, V 3 und V 5 auf. Sie erhielten im November 1988 eine Stalldüngung von 300 dt · ha⁻¹ FM.

Die **Kornerträge** von Winterroggen waren 1990 nach Kartoffel, 1991 nach Winterroggen und 2001 nach Silomais bei einer Mineraldüngung von jeweils 100 kg N, 20 kg P und 70 kg K pro Hektar und Jahr bei V 5 mit 47,9 (1990) bis 54,8 dt · ha⁻¹ (2001) stets, z.T. signifikant höher als bei den Meliorationsvarianten V 1 bis V 4. Gleiches gilt für Wintergerste (1999), die nach Silomais angebaut und mit 120 kg N und 220 kg K pro Hektar gedüngt wurde. Dem mittleren Kornertrag von rund 47 dt · ha⁻¹ ist ein Korn:Stroh-Verhältnis von 1:0,84 zuzuordnen. Die signifikant höchsten Kornerträge werden bei V 5 mit 53,5 dt · ha⁻¹ erzielt.

In der Tabelle XII sind die für die Rekultivierungsabschnitte nach dem GE-Schlüssel (Autorenkollektiv 1993) berechneten mittleren GE-Erträge pro Hektar und Jahr zusammengestellt.

Im ersten Rekultivierungsabschnitt von 1962 bis 1965 (ohne NPK-Mineraldüngung) steigen die Roherträge mit der bodenmeliorativen CaO-Gabe an. Sie sind bei V 5 mit beachtlichen 42,9 dt GE ha⁻¹ · a⁻¹ am höchsten und bestätigen die große Bedeutung, die die aus der Säure-Basen-Bilanz des Rohbodens abgeleitete meliorative CaO-Gabe für den Erfolg der landwirtschaftlichen Rekultivierung hat. Der zweite Rekultivierungsabschnitt beginnt nach der Umstellung des Versuches im Jahr 1965 und endet 1988 mit dem Luzerneumbruch. In dieser Zeit erfolgte eine regelmäßige NPK-Mineraldüngung zur Frucht. Der mittlere Jahresertrag von 55,1 dt GE · ha⁻¹ bei V 5 entspricht bereits dem Ertragsniveau der D 3-Standorte im Lausitzer Braunkohlenrevier. Auffällig ist der starke Ertragsanstieg bei V 2, der vor allem durch die dauerhafte Verbesserung der Aziditätsverhältnisse ab 1966 erreicht wurde. Die Erträge sind bei V 4 trotz der höheren CaO-Gabe (261 dt · ha⁻¹) geringer als bei V 1 (173 dt · ha⁻¹ CaO) und V 3 (237 dt · ha⁻¹ CaO), was mit den Reaktionsverhältnissen in der oberen Bodenschicht zusammenhängt.

Der letzte Rekultivierungsabschnitt beginnt mit den Gesundheits- (V 1, V 3, V 4) und Erhaltungskalkungen (V 2, V 5) von 1988 und leitet die ordnungsgemäße Bodennutzung durch die Landwirtschaft ein. Die von 1989 bis 2001 ausgewerteten Pflanzenerträge sind bei V 5 mit durchschnittlich 51,2 dt GE · ha⁻¹ · a⁻¹ am höchsten. Sie liegen aber unter denen des vorangegangenen Rekultivierungsabschnittes, verursacht durch den höheren Getreideanteil von 28,6 % an der Fruchtfolge und den Ertragsausfall bei Winterraps durch Vogelfrassschäden. Die Ertragsanstiege bei V 1, V 3 und V 4 sind auf die verbesserten Reaktionsverhältnisse zurückzuführen. Die Ertragsdifferenzen zwischen V 2 und V 5 resultieren offenkundig aus der geringeren Mächtigkeit der durchwurzelbaren Bodenschicht bei V 2. Das wirkt sich in Trockenjahren besonders nachteilig auf die Ertragsentwicklung aus. Möglicherweise ist aber

Tabelle XII. Mittlere jährliche Pflanzenerträge in dt GE/ha der Meliorationsvarianten in den verschiedenen Rekultivierungsabschnitten mit den dazugehörigen Fruchtartenanteilen.

Table XII. Average yearly plant yields in dt GE/ha of the amelioration variants in the different recultivation areas combined with belonging parts of fodder species.

Variante	Rekultivierungsabschnitt			
	1962/63 - 1964/65	1965/66 - 1988	1989 - 2001	Gesamt-Jahresmittel
V 1	26,3	42,1	43,8	41,4
V 2	26,3	53,6	43,6	48,2
V 3	29,2	41,8	44,1	41,6
V 4	30,6	36,3	40,0	37,1
V 5	42,9	55,1	51,2	52,9
\bar{x}	31,1	45,8	44,5	44,2
	Fruchtartenanteile (%)			
Wintergetreide	-	7,4	28,6	12,8
Hackfrüchte	-	18,5	7,1	12,8
Ölfrüchte	-	-	7,1	2,1
Futterpflanzen	100	70,4	57,2	70,2
davon: Luzerne	-	25,9	35,7	25,6
Gras	-	18,5	-	10,6
Wzwrfr.	50	14,8	7,1	17,0
Sozwrfr.	16,7	-	-	2,1
andere	33,3	11,2	14,4	14,9
Brache	-	3,7	-	2,1

auch die Durchwurzelungsintensität bei V 2 geringer. Beides, Durchwurzelungsintensität und Durchwurzelbarkeit, ist eng verknüpft mit dem Stand der Bodenentwicklung respektive mit der Entsäuerung des Untergrundes durch Säureauswaschung und Baseneintrag. Auf diesen Sachverhalt deutet auch ein Ertragsvergleich zwischen V 4 mit V 1 bzw. V 3 hin, denn die niedrigeren Gesamt-GE-Erträge bei V 4 sind nicht durch eine geringere CaO-Zuführung verursacht worden (vgl. Tabelle 1). Hier hat die starke Basentiefenverlagerung durch die Abwasserlandbehandlung zu vergleichsweise niedrigeren Basensättigungsverhältnissen in der oberen Bodenschicht und dadurch zu Ertragseinbußen geführt, was durch Nachkalkungen nicht vollends kompensiert werden konnte. Demnach ist es vorteilhafter, wenn die meliorative Düngekalkgabe geteilt und die zweite Teilgabe nach der Abwasserverrieselung mindestens 60 cm tief innig mit dem Boden vermischt wird.

4. Schlussfolgerungen

- Der Bodenhumus landwirtschaftlich genutzter stark kohlehaltiger Kippenböden besteht aus einem Gemisch rezenter und fossiler organischer Substanzen. Die rezente organische Substanz ist überwiegend dem Nährhumus zuzuordnen und wird wegen ihrer leichteren biologischen Abbaubarkeit nahezu vollständig mineralisiert, während die fossile Humussubstanz über mehrere Jahrzehnte als dominanter Bestandteil der Huminstoffe (Dauerhumus) erhalten bleibt.
- Die Humusentwicklung in den landwirtschaftlich genutzten Kipp-Kohlelehmsanden unterscheidet sich grundsätzlich von der unter Wald. Im Wald fehlt der fördernde Einfluss der ständig sich wiederholenden Bodenbearbeitung auf den Abbau der neu gebildeten Streustoffe, und es kommt zu einer stärkeren Anreicherung von rezentem Kohlenstoff im Mineralboden (A_n -Horizont).

- Die Verrieselung großer Mengen an biologisch gereinigten N-reichen Industrieabwässern bewirkt in Kombination mit den N-Mineraldüngungen zur Frucht und unter dem Einfluss futterbetonter Fruchtfolgen eine Verengung der C/N-Verhältnisse im Versuchsmittel von ≥ 60 auf < 30 bis 18 in der Ackerkrume.
- Der Aufbau N-reicher Huminsäuren wird durch eine über mehrere Jahrzehnte andauernde deutliche Verbesserung der Aciditätsverhältnisse ($\text{pH}_{\text{KCL}} \geq 5,5$) begünstigt.
- Die N-reichen Huminstoffe entstehen vermutlich vornehmlich aus den polymerisationsfähigen aromatischen Zersetzungsprodukten der kohligen Substanz durch die Anlagerung von N an die reaktiven Gruppen und den Einbau von N in die Ringstrukturen.
- Die sehr hohen heißwasserextrahierbaren C-Gehalte von durchschnittlich 820 mg C_{hwl} /100 g FB in der Ackerkrume bis 868 mg C_{hwl} /100 g FB in 150 - 160 cm Profiltiefe weisen auf eine scheinbare OS-Übersorgung hin. Die extrem weiten C_{hwl} / N_{hwl} -Verhältnisse von rund 1.200 bis 3.000 dokumentieren, dass die am leichtesten umsetzbare Komponente von der umsetzbaren Kohlenstoffmenge extrem N-arm ist und mit großer Wahrscheinlichkeit vor allem aus den heißwasserlöslichen organischen Verbindungen und Zersetzungsprodukten der fossilen Humussubstanz besteht.
- Die N_{t} -Gehalte der kohlehaltigen Kippenböden stehen in enger Beziehung zu den C_{t} -Gehalten und beeinflussen signifikant das N-Nachlieferungsvermögen (N_{min} , N_{hwl}) in der Ackerkrume und mit Einschränkung auch in den tieferen Bodenschichten.
- Durch die Abwasserlandbehandlung und die stets über den Pflanzenertrag liegende P-Düngung wird eine starke P-Anreicherung in der Ackerkrume und durch P-Verlagerung bis in 65 cm Bodentiefe erreicht, wie die C/P-Verhältnisse von < 100 bis 150 beweisen.
- Durch die Grundmelioration sowie acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen werden die N_{t} - sowie HCl-löslichen P_{t} und Mg_{t} -Bodenvorräte stark erhöht. Sie liegen nach einer Rekultivierungszeitdauer von ca. 40 Jahren bis in 35 cm Profiltiefe bei 1,88 - 2,88 % N_{t} , 0,59 bis 0,96 % P_{t} und 1,0 bis 2,3 % Mg_{t} . Die K-Anreicherungsrate ist gering, so dass die K_{t} -Gehalte von 0,34 bis 0,63 % deutlich unter den Gehaltswerten unverritzter Mineralböden liegen.
- Der Einfluss der Bodenreaktion auf die N_{min} -Gehalte ist unter den gegebenen Versuchsbedingungen vergleichsweise gering, zumal die variantenabhängige Differenziertheit der Pflanzenerträge einen starken Einfluss auf den Pflanzenentzug und damit auf die N_{min} -Bodenvorräte ausübt. Indizien für eine stärkere N-Mineralisierung und Nitrifikation bei pH_{KCL} -Werten $\geq 5,5$ sind jedoch vorhanden.
- Die N-Mineraldüngung richtet sich wie in der Landwirtschaft üblich nach den N_{min} -Bodenvorräten und dem N-Bedarf der Kulturpflanzen und wird in den ersten 10 bis 20 Rekultivierungsjahren deutlich über dem Pflanzenentzug liegen.
- Die hohe Phosphatpufferung und die geringe K-Sättigung der kohlehaltigen Kippenböden bedingen, dass bis zum Erreichen der Gehaltsklassen von 5,6 - 8 mg P_{DL} und 8 - 11 mg K_{DL} pro 100 g Boden stets über den Pflanzenentzug und danach grundsätzlich nach dem Pflanzenentzug gedüngt werden sollte.
- Die $Mg_{(\text{CaCl}_2)}$ -Sollwerte von ca. 5 mg/100 g FB werden bereits durch die Verwendung Mg-haltiger Düngemittel relativ schnell erreicht.
- Die nach der Säure-Basen-Bilanz grundmeliorierten Kipp-Kohlelehmsande entwickeln sich unter dem Nutzungseinfluss futterpflanzenbetonter Fruchtfolgen im Verlaufe von 30 bis 40 Jahren zu produktiven Pflanzenstandorten mit einem mittleren GE-Ertrag von rund $50 \text{ dt} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

- Fehlerhaft ausgeführte Grundmeliorationen wie beispielsweise die Applikation zu niedriger Kalkgaben wirken sich nachteilig auf die Boden- und Ertragsentwicklung aus und führen zu Mindererträgen, die durch spätere Kompensationskalkungen nicht vollends behoben werden können.
- Die Pflanzenenerträge sind auf den Kippenstandorten stark niederschlagsabhängig, so dass die Mächtigkeit der durchwurzelbaren Bodenschicht von wesentlicher Bedeutung für den Rekultivierungserfolg ist. Deshalb ist für die landwirtschaftliche Rekultivierung kohle- und schwefelhaltiger Kippenböden eine 100 cm tiefe Grundmelioration zu empfehlen.
- Die hervorragende Eignung basenreicher Braunkohlenaschen als Kalkdüngemittel bei der Melioration schwefelhaltiger Kippenböden wird erneut bestätigt.

Literatur

- Autorenkollektiv 1993. Faustzahlen für Landwirtschaft und Gartenbau. 12. Auflage, Landwirtschaftsverlag GmbH, Münster-Hiltrop.
- Autorenkollektiv 2000. Rahmenempfehlungen zur Düngung 2000 im Land Brandenburg.
- Behm R. 1988. Untersuchungen zur Bestimmung der leicht umsetzbaren N-C-Anteile im Heißwasserextrakt von Böden. *Arch Acker- Pfl Boden* 32: 333–335.
- Fischer K, et al. 1999. Bodenverbessernde Substrate aus Massenabfällen für die landwirtschaftliche Rekultivierung. Teilthema: Untersuchung der Humusbildung. BMBF-Förderprojekt, FKZ 14700933, Abschlussbericht, Tharandt, d. 24.07.1999.
- Ghani M, Dexter M, Porrott KW. 2003. Hot-water extrable carbon in soils: a sensitive measurement for determining impacts of fertilisations, grazing and cultivation. *Soil Biology & Biochemistry* 35: 1231–1243.
- Herzschuh R, et al. 1998. Laborexperimente und analytische Untersuchungen über den Eintrag organischer Stoffe in Grundwässer und Restseegewässer bei der Flutung von Braunkohletagebauen. - Tagungsband 2. BMBF-Statusseminar.
- Katzur J, Fischer K, Böcker L, Liebner F, Schiene R. 2002. Gefäss- und Freilandversuche zur Eignung von Braunkohle als Bodenverbesserungsmittel. *Arch Acker-Pfl Boden*, 48: 241–255.
- Katzur J, Böcker L. 2005. 40 Jahre Daueraufbringungsversuch DA/58 - ein Beitrag zur Boden- und Ertragsentwicklung landwirtschaftlich genutzter schwefel- und kohlehaltiger Kippenböden. 1. Mitteilung: Versuchsbeschreibung, Entwicklung der Aciditäts- und Basensättigungsverhältnisse. *Archives of Agronomy and Soil Science* 50 (im Druck).
- Kögel-Knabner J, Rumpel C, Hüttl RF. 1997. Humusbildung und Bodenentwicklung auf rekultivierten Flächen des Braunkohlenbergbaus der Niederlausitz. *Karlsruher Schriftenreihe zur Geographie und Geoökologie*, Bd. 7, 25–32.
- Körschens M, Schulz E, Behm R. 1990. Heißwasserlöslicher C und N im Boden als Kriterium für das N-Nachlieferungsvermögen. *Zentralbl Mikrobiol* 145: 305–311.
- Landgraf D, Klose S. 2002. Mobile and readily available C and N fractions and their relationship to microbial biomass and selected enzyme activities in a sandy soil under different management systems. *J Plant Nutr Soil Sci* 165: 9–16.
- Markgraf G. 1970. Untersuchungen zur Bestimmung von Menge und Qualität des Bodenhumus und dessen Veränderungen im Humifizierungsprozess. Diss. Humboldt-Uni. Zu Berlin.
- Reuter G. 1967. Gelände- und Laborpraktikum der Bodenkunde. VEB Landwirtschaftsverlag Berlin, 68–70.
- Schulz E. 1990. Die heißwasserextrahierbare C-Fraktion als Kenngröße zur Einschätzung des Versorgungszustandes der Böden mit organischer Substanz (OS). *Tag Ber Akad Landwirtsch-Wiss Berlin* 295: 269–275.
- Weber E. 1976. Grundriß der biologischen Statistik. 6. Auflage, VEB Gustav Fischer Verlag Jena.
- Welte E. 1956. Zur Konzentrationsmessung von Huminsäuren. *Z. f. Pflanzenernähr Düng Bodenkd* 74: 219–227.
- Wünsche M. 1977. Zusammensetzung und Eigenschaften der organischen Substanz quartärer und tertiärer Abraumsstrate im Braunkohlenrevier südlich von Leipzig. In: *Technik und Umweltschutz - Leipzig*, H. 18, 156–163.