

FREILANDVERSUCHE ZUR EIGNUNG CHEMISCH VERÄNDERTER WEICHBRAUNKOHLE ALS BODENVERBESSERUNGSMITTEL BEI DER LANDWIRTSCHAFTLICHEN REKULTIVIERUNG HUMUSFREIER KIPPENBÖDEN¹

JOACHIM KATZUR^a, KLAUS FISCHER^b, LUTZ BÖCKER^{a,*}, FALK LIEBNER^b und
RAINER SCHIENE^b

^aForschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB), Brauhausweg 2, D-03238 Finsterwalde,
Deutschland; ^bTechnische Universität Dresden, Institut für Pflanzenchemie und Holzchemie,
Piemmer Straße 23, D-01737 Tharandt, Deutschland

(Received 21 May 2003)

Die bodenmeliorativen und ertragssteigernden Effekte des Einsatzes von N-modifizierter Weichbraunkohle als Humusdüngestoff bei der landwirtschaftlichen Rekultivierung humusfreier Kippenböden werden in mehreren Freilandversuchen überprüft. In diesem Beitrag wird über die zu Rekultivierungsbeginn mit W.-Roggen, W.-Weizen, Kartoffeln und Luzerne erzielten Ergebnisse berichtet.

Stichwörter: N-modifizierte Braunkohle; Humusdünger; Pflanzenertrag

FIELD EXPERIMENTS WITH N-MODIFIED BROWN COAL AS HUMUS FERTILIZER IN AGRICULTURAL REVITALISATION OF HUMUS FREE DUMP SOILS

Soil ameliorative and yield improving effects of N-modified brown coal applications as humus fertilizer in agricultural revitalisation of dump soils which are free of humus are investigated in some field trials. This paper reports about results of winter rye, winter wheat, potatoes and alfalfa at the beginning of revitalisation.

Keywords: N-modified brown coal; Humus fertilizer; Plant yield

*Corresponding author: E-mail: l.boecker@fib-ev.de

¹Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse sind Bestandteil des vom BMBF geförderten Forschungsprojektes „Untersuchungen zur Eignung neuartiger Humusersatzstoffe als Bodenverbesserungsmittel bei der Rekultivierung von Bergbauflächen und Sanierung von Problemstandorten“ (FKZ 0339739).

1. EINLEITUNG

Die chemisch veränderte Weichbraunkohle wird nach einem patentierten Verfahren (Fischer *et al.*, 1999) mittels oxidativer Ammonolyse hergestellt. Sie ist sehr schadstoffarm, reich an Stickstoff unterschiedlicher Bindungsarten und besitzt Humuseigenschaften. In Labor- und Gefäßversuchen konnten ihre positiven Effekte auf die mikrobiellen und enzymatischen Umsatzleistungen aus dem C-, N- und P-Kreislauf sowie auf wichtige Merkmale der Bodenfruchtbarkeit nachgewiesen werden (Katzur *et al.*, 2002 a + b; 2003). Die Quantifizierung der N-Düngewirkung ergab Mineraldüngeräquivalente von 30 bis 35, d.h., 30 bis 35 kg N Mineraldünger haben die gleiche Ertragswirkung wie 100 kg N aus dem Humusersatzstoff (HES).

Die hohe Abbauresistenz des neuen Humusdüngestoffes begründet seine Verwendung als Bodenverbesserungsmittel (BVM) insbesondere bei der landwirtschaftlichen Rekultivierung von humusfreien Kippenböden. Außerordentlich vorteilhaft sind seine vergleichsweise geringen N_{\min} - und hohen N_{fog} -Gehalte (fest organisch gebundener N) sowie die hohe Kationenaustauschkapazität (KAK_{pot}) der dominanten organischen Substanz (Dauerhumus). Dadurch kann die N-modifizierte Braunkohle in bodenmeliorativen, die biologische Rekultivierung vorbereitenden Gaben zur kurzfristigen Erhöhung der C_{org} - und N_{t} -Bodenvorräte sowie zum Aufbau einer langsamfließenden N-Quelle ausgebracht werden, ohne dass es zu Düngungsschäden und höheren N-Auswaschungsverlusten kommt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse mehrerer Freilandversuche zur Anwendung der N-modifizierten Braunkohle als Bodenverbesserungsmittel bei der landwirtschaftlichen Rekultivierung humusfreier Kippenböden vorgestellt.

2. METHODIK

In dem landwirtschaftlichen *Rekultivierungsversuch HES I-L 2000* werden die Einflüsse mengenmäßig differenzierter HES-Gaben auf wichtige Merkmale der Bodenfruchtbarkeit und den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen untersucht sowie das im Gefäßversuch ermittelte Mineraldüngeräquivalent (MDÄ) für Stickstoff aus dem Humusersatzstoff überprüft. Die Varianten und Angaben zur Versuchsdurchführung enthält Tabelle I.

Der Freilandversuch ist auf der Absetzerkippe des Tagebaues Welzow-Süd ohne eine echte Wiederholung angelegt worden. Um eine statistische Auswertung der Versuchsergebnisse zu ermöglichen, sind in jeder der 50 m × 50 m großen Versuchsparzellen, sie entsprechen jeweils einer Behandlungsvariante, 9 ständige Auswerteparzellen von 1 m² Größe fest eingemessen worden. Aus 5 der regelmäßig über die Versuchsparzellen verteilten Auswerteparzellen wurden vor Versuchsbeginn Bodenmischproben mit dem Bohrstock (10 Einstiche/Auswerteparzelle) entnommen und auf Textur, pH sowie die C_{t} -, N_{t} -, S_{t} -, CaCO_3 - und N_{\min} -Gehalte untersucht. Zusätzlich wurden 2 Bodenschürfe zur Entnahme von Beutel- und Strukturproben (100 ccm) bis in 100 cm Tiefe angelegt. An diesen Bodenproben sind die Sorptions-, Nährstoff- und Gefügeverhältnisse umfassend analysiert worden.

Nach der Grundbodenbearbeitung (mitteltiefes Pflügen, 1 × Scheiben und 1 × Eggen) wurden die Humus- und Mineraldüngergaben mit dem Düngerstreuer ausgebracht und krumentief in den Boden eingearbeitet. Die Rekultivierungsertragsfolge

TABELLE I Landwirtschaftlicher Rekultivierungsversuch HES I-L/2000*
 TABLE I Agricultural revitalisation trial HES I-L/2000

<i>Grundmelioration (19./20.09.2000)</i>						
<i>Variante</i>	<i>HES-Gabe</i> (79,8% TS; 65,8% C _i ; 5,253% N _i)			<i>Harnstoffgabe</i> (kg N/ha)	<i>PK-Grunddüngung</i> (kg R N/ha)	
	<i>t TM/ha</i>	<i>kg N_i/ha</i>	<i>kg N_{MDA}/ha</i>		<i>P</i>	<i>K</i>
1	–	–	–	50,0	65	150
2	1,50	78,8	23,6	26,4	65	150
3	3,75	197,0	59,1	–	65	150
4	7,50	394,0	118,2	–	65	150

<i>Versuchsdurchführung</i>				
<i>Fruchtfolgeglied</i>	<i>Aussaat-</i>		<i>Erntetermin</i>	<i>Bemerkungen</i>
	<i>Menge</i> (kg/ha)	<i>Termin</i>		
W.-Roggen "Nikita"	200	26.09.2000	25.07.2001	20.04.01: 120 kg N/ha 14.08.01: Stroh gemulcht, gepflügt
So.-Zwischenfrucht (Senf)	19	16.08.2001	17.09.2001	16.08.01: 28 kg N/ha, Saatbettbereitung 17.09.01: Senf gemulcht
W.-Roggen "Nikita"	165	09.10.2001	19.07.2002	19.09.01: HES-Applikation lt. Versuchsplan wiederholt 20.09.01: 100 kg P/ha, 150 kg K/ha, Saatbettbereitung 12.03.02: 100 kg N/ha 07.05.02: 50 kg N/ha

*Substrattyp (AG Boden, 1996): Flacher Kipp-Reinsand mit Beimengungen von CaCO₃-führenden Reinsanden und Lehmsanden sowie Lehmsand über Kipp-Reinsand und Kipp-Lehmsand mit Beimengungen CaCO₃-haltiger Lehmsande und Sandlehme

Kurzzeichen: oj-[(c)ss + ls) + ls]ss\oj-(c)ls + sl)ss + ls.

begann mit Winterroggen, der im Frühjahr des Folgejahres nur eine N-Gabe erhielt. Nach einer flachen Stoppelpflanzung und N-Ergänzungsdüngung zur Strohdüngung (0,75 kg N/dt Stroh) erfolgte die Aussaat von Senf. Der Senf wurde zur Gründüngung genutzt und zusammen mit den PK-Mineraldünger sowie den bei den Varianten 2 bis 4 erneut ausgebrachten HES-Gaben in den Boden eingearbeitet. Anschließend erfolgte die Aussaat von Winterroggen.

Im landwirtschaftlichen *Testversuch HES-TV/2001* werden die bodenverbessernden und ertragssteigernden Effekte bodenmeliorativer HES-Gaben von 7,5 bis 30,0 t TM/ha mit Kartoffel und Luzerne als erstes und Winterweizen als zweites Glied einer Anlauffruchtfolge geprüft (vgl. Tabelle II). Die Anlauffruchtfolge mit Kartoffel widerspricht grundsätzlich der Rekultivierungspraxis (Autorenkollektiv 1982). Sie soll klären, ob und inwieweit durch den Einsatz von N-modifizierter Braunkohle als Bodenverbesserungsmittel der landwirtschaftliche Rekultivierungsprozess beschleunigt und dadurch der Kartoffelanbau zeitlich vorverlegt werden kann.

Der Testversuch besteht aus 4 Parzellen von 20 m × 12,5 m Größe, die nach einer einheitlichen Grundbodenbearbeitung für die Aufnahme der Varianten 1 (V1) bis 4 (V4)

TABELLE II Landwirtschaftlicher Testversuch HES-TV/2001*
 TABLE II Agricultural test trial HES TV/2001*

<i>Grundmelioration (24.04.2001)</i>						
<i>Variante</i>	<i>HES-Gabe</i> (83,3% TS; 64,9% C _i ; 5,253% N _i)			<i>Mineraldüngergabe</i> (kg RN/ha)		
	<i>t TM/ha</i>	<i>kg N_i/ha</i>	<i>kg N_{MDA}/ha</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>
1	–	–	–	177,3**	65,0	250,0
2	7,5	394	118	–	65,0	250,0
3	15,0	788	236	–	65,0	250,0
4	30,0	1576	473	–	65,0	250,0

<i>Versuchsdurchführung</i>					
<i>Fruchtfolge</i>	<i>Fruchtfolglied</i>	<i>Aussaat-</i>		<i>Erntetermin</i>	<i>Bemerkungen</i>
		<i>Menge</i>	<i>Termin</i>		
A	Kartoffel "Adretta"	45.000 Stck/ha	03.05.01	06.09.01	19.09.00: Grundbodenbearbeitung
					03.05.01: Pflanzbettvorbereitung
	W.-Weizen "Bandit"	180 kg/ha	09.10.01	25.07.02	14.06.01: häufeln, striegeln; manuelle Pflege
					11.07.01: vorbeug. Spritzung gegen Phytophthora (1,8 kg/ha Dithane Neo Tec)
B	Luzerne "Diana"	30 kg/ha (geimpft)	25.04.01	16.05.02	15.08.01: Krautabtötung(mechanisch)
					09.10.01: Saatbettbereitung (Kreiselegge)
					13.03.01: 100 kg N/ha
					07.05.02: 50 kg N/ha
					19.09.00: Grundbodenbearbeitung
				04.07.02 19.09.02	25.04.01: Saatbettvorbereitung 14.08.01: Schröpfschnitt 12.03.02: 20 kg P/ha, 200 kg K/ha

*Substrattyp (AG Boden 1996): Kiesführende Kipp-Kalksandlehme und Kipp-Sandlehme

Kurzzeichen: oj-(k)csI + (k)sl

**45% der N_i-Gabe bei Variante 2

mit den Fruchtfolgen A und B vorbereitet wurden. Der bei V1 im Rahmen der Grundmelioration ausgebrachten N-Mineraldüngergabe liegt noch die Annahme zugrunde, dass 45% der bei V 2 mit 7,5 t TM/ha HES applizierten N_i-Gabe boden- und ertragswirksam sind.

Aus jeder Versuchsparzelle sind vor Versuchsbeginn Bodenmischproben aus verschiedenen Tiefenstufen mit dem Bohrstock entnommen und analysiert worden.

Die Luzerne- und Winterweizenerträge wurden auf 6 bzw. 5 regelmäßig über die Versuchsparzellen verteilt, 1 m² großen ständigen Auswerteparzellen ermittelt. Bei der Kartoffel sind die Knollenerträge für jeweils 10 Pflanzreihen (Reihenabstand 75 cm) erfasst und wie bei allen anderen Hauptfrüchten mittels einfacher Varianzanalyse statistisch ausgewertet worden (Weber, 1967).

Aufgrund der starken Heterogenität der Kippenstandorte wurde zwecks besserer Absicherung der Prüfergebnisse noch der *Testversuch HES-LAUBAG 2001* mit 3 Anlauffruchtfolgen angelegt (vgl. Tabelle III). In jede der 9 Versuchspartellen (10 m × 8 m) sind bei W.-Roggen und Luzerne 6 ständige, 1 m² Auswertepartellen eingemessen worden. Die Ertragsermittlungen erfolgten bei W.-Weizen mit dem Partellenmäh-drescher (6 × 12 m² pro Variante) und bei Kartoffel durch Handrodung von 10 × 5 m langen Pflanzreihen pro Variante. Vor der Grundbodenbearbeitung sind Bodenproben entnommen worden.

TABELLE III Landwirtschaftlicher Testversuch HES-LAUBAG/2001*
TABLE III Agricultural test trial HES-LAUBAG/2001*

<i>Grundmelioration (09.05.2001)</i>							
<i>Variante</i>	<i>Fruchtfolge</i>	<i>HES-Gabe</i> (83,3% TS; 64,9% C _t ; 5,253% N _t)			<i>Mineraldüngergabe</i> (kg RN/ha)		
		<i>t TM/ha</i>	<i>kg N_t/ha</i>	<i>kg N_{MDA}/ha</i>	<i>N</i>	<i>P</i>	<i>K</i>
1	A, C	–	–	–	80	160	160
	B	–	–	–	160	160	160
2	A, C	7,5	394	118	–	160	160
	B	15,0	788	236	–	160	160
3	A, C	15,0	788	236	–	160	160
	B	30,0	1576	473	–	160	160

<i>Versuchsdurchführung</i>					
<i>Fruchtfolge</i>	<i>Fruchtfolgeglied</i>	<i>Aussaat-</i>		<i>Erntetermin</i>	<i>Bemerkungen</i>
		<i>Menge</i>	<i>Termin</i>		
A	Senf	30 kg/ha	10.05.01	14.08.01	Gründüngung (Kreiselegge) 20.09.01: 100 kg P/ha, 150 kg K/ha Saatbettbereitung 12.03.02: 100 kg N/ha 07.05.02: 50 kg N/ha
	W.-Roggen "Nikita"	165 kg/ha	09.10.01	25.07.02	
B	Kartoffel "Afra"	45.000 Stck/ha	09.05.01	02.10.01	14.06.01: häufeln, striegeln, manuelle Pflege 11.07.01: vorbeug. Spritzung gegen Phytophthora (1,8 kg/ha Dithane Neo Tec) 20.09.01: Krautabtötung (mechanisch)
	W.-Weizen "Bandit"	180 kg/ha	09.10.01	25.07.02	
C	Luzerne "Diana"	30 kg/ha (geimpft)	10.05.01	02.10.01	09.05.01: Saatbettvorbereitung 14.08.01: Schröpfschnitt 12.03.02: 20 kg P/ha, 20 kg K/ha
				16.05.02 04.07.02 10.09.02	

*Substrattyp (AG Boden 1996): Kipp-Kalklehmsand
Kurzzzeichen: oj-clS

Die Ernteprodukte und das Getreidestroh wurden auf ihre TS-, Nährstoff- und NO_3 -Gehalte untersucht. Bei Kartoffel sind außerdem die Stärkegehalte bestimmt worden. Alle Feststoffproben wurden von einem akkreditierten Forschungslabor analysiert.

3. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

3.1. Bodenfruchtbarkeitsmerkmale

Im Versuch *HES I-L/2000* werden durch die Düngung mit N-modifizierter Braunkohle die C_t - und N_t -Gehalte im Oberboden kurzfristig erhöht (Tabelle IV). Signifikante Steigerungsraten zu den Ausgangswerten vom 19.09.2000 (\bar{C}_t 0,116%, \bar{N}_t 0,009%) liegen jedoch nur bei einer HES-Applikation von 7,5 t TM/ha (V 4) vor. In der Tendenz ist eine mit der Humusgabe steigende Erweiterung der C/N-Verhältnisse von 10,4 (V 1) auf 14,7 (V 4) angedeutet, was unter anderem auf die höheren N-Entzugswerte insbesondere bei V 4 (vgl. Tabelle VI) zurückgeführt wird. Bedeutsam ist, dass der Stickstoff fast ausschließlich organisch gebunden vorliegt. Aus der Relation von N_{\min} zu N_t ergibt sich eine mittlere N-Mineralisierungsrate von 0,55% (V 4) bis 2,1% (V 1), d.h., zu Rekultivierungsbeginn nimmt die Netto-N-Mineralisation tendenziell mit steigender HES-Gabe ab. Das weist zugleich auf eine stärkere N-Immobilisierung in den HES-gedüngten Kippenböden hin. Offensichtlich unterscheidet sich die mit dem BVM ausgebrachte organische Substanz (Dauerhumus) in ihrer Umsetzungsdynamik und damit auch in der Nährstoffbereitstellung stark von den leichter abbaubaren rezenten Humusstoffen (Nährhumus). Diese Vermutung wird durch die signifikant niedrigeren N_{\min} -Bodenvorräte bei V 2 bis V 4 bestätigt. Allerdings beruht die Ertragswirkung der organischen Dünger nicht allein auf ihre Nährstoffwirkung, sondern auch auf die Verbesserung der Bodeneigenschaften. Beispielsweise werden durch die HES-Applikation die KAK_{pot} -Werte erhöht. Obwohl dieses Ergebnis statistisch nicht gesichert ist, so entspricht es doch annähernd den in Dauerversuchen auf diluvialen sandigen Böden (Sl 4) erzielten. Hiernach bewirkt die Erhöhung des Humusgehaltes um 0,1% C_t eine um 0,4 mval/100 g Boden höhere KAK_{pot} (Asmus *et al.*, 1999).

Die Humusdüngung beeinflusst signifikant die K_{DL} - und tendenziell die $Mg_{(\text{PV})}$ -Bodenvorräte (vgl. Tabelle IV). Ursache ist die ausgeprägte Selektivität der organischen Substanz für Ca^{2+} . Infolgedessen nehmen bei höheren Anteilen organischer Austauschere an der KAK_{pot} die prozentualen Anteile von K^+ und Mg^{2+} am Kationenbelag ab. Die desorbierten Kationen können entweder verstärkt ausgewaschen und/oder durch die Pflanzen der Bodenlösung entzogen werden, so dass die K_{DL} - und $Mg_{(\text{PV})}$ -Gehalte in der Ackerkrume abnehmen.

In der Tabelle V sind die 22 Monate nach der Grundmelioration in der Ackerkrume der *Testversuche* erhobenen Bodenkennwerte zusammengestellt. Auch sie belegen den deutlichen Anstieg der C_{org} - und N_t -Gehalte mit steigender Humusgabe. Da die Abbauresistenz der ligninbürtigen (Kohle-) Huminstoffe durch die N-Anreicherung nicht bzw. nur unwesentlich vermindert wird, unterliegt der fest organisch gebundene Stickstoff ähnlichen Abbaugeschwindigkeiten wie der Dauerhumus und trägt dadurch wesentlich zum Anstieg der N_t -Gehalte bei.

Beachtlich sind die ohne HES-Zusätze erzielten C_{org} - und N_t -Gehalte in der Ackerkrume. Die aus den Analysenwerten für eine 20 cm mächtige Bodenschicht (rd. 2.600 t/ha) berechneten N_t -Vorräte liegen mit 702 kg N_t /ha (HES-TV/2001) und 546 kg N_t /ha (HES-LAUBAG/2001) über den Ausgangswerten (einschließlich N-Grunddün-

TABELLE IV Rekultivierungsversuch HES I-L/2000 – Bodenkennwerte der Ackerkrume (0–30 cm) vom 18.09.2001 ($n = 5$)
 TABLE IV Revitalisation trial HES I-L/2000 – soil characteristics of the mould (0–30 cm) 18.09.2001 ($n = 5$)

Variante*	pH_{KCL}	pH_{H_2O}	C_t (%)	N_t (%)	C/N -Verh.	Pflanzenverfügbare Nährstoffe (mg/100 g FB)				KAK_{pot} (mval/100 g FB)	BS (%)	Sättigung (%)	
						N_{min}	P_{DL}	K_{DL}	$Mg_{(PV)}$			Mg	K
1	6,98	7,54	0,120	0,0116	10,4	0,242	3,16	4,78	4,36	2,48	89,9	11,3	4,4
2 (1,5)	6,92	7,52	0,184	0,0150	12,6	0,126	2,42	4,54	4,30	2,82	92,7	9,9	3,2
3 (3,75)	6,84	7,46	0,174	0,0146	11,8	0,142	1,54	2,88	3,18	2,62	74,9	9,2	3,0
4 (7,50)	6,88	7,66	0,306	0,0210	14,7	0,116	2,16	3,12	2,84	2,82	89,8	8,5	3,3
\bar{x}	6,90	7,54	0,196	0,0156	12,4	0,156	2,32	3,83	3,67	2,68	86,8	9,7	3,5
GD 5%	1,33	1,14	0,067	0,0048	3,38	0,070	1,65	1,58	1,56	0,62	36,75	n.b.**	n.b.

*in Klammer die HES-Gabe in t TM/ha

**n.b. = nicht berechnet

TABELLE V Testversuche HES-TV/2001 und HES-LAUBAG/2001 – Bodenkennwerte der Ackerkrume (0–20 cm) vom 28.02.2003 nach Luzerneanbau
 TABLE V Test trial HES-TV/2001 and HES-LAUBAG/2001 – soil characteristics of the mould (0–20 cm) 28.02.2003 after alfalfa cultivation

Kennwert*/Versuch	HES-TV/2001 (Fruchtfolge B) HES-Gabe (t TM/ha)				HES-LAUBAG/2001 (Fruchtfolge C) HES-Gabe (t TM/ha)		
	0	7,5	15,0	30,0	0	7,5	15,0
pH_{H_2O}	8,2	8,0	7,9	7,7	8,1	8,0	8,0
pH_{KCL}	7,6	7,6	7,5	7,4	7,7	7,6	7,7
C_t (%)	0,62	0,86	0,79	1,20	0,60	1,05	1,3
N_t (%)	0,027	0,047	0,045	0,073	0,021	0,040	0,046
$CaCO_3$ (%)	1,4	1,2	n.nwb.***	0,3	2,2	3,0	2,4
C_{org} (%)**	0,45	0,72	0,79	1,17	0,34	0,69	1,01
C_t/N_t -Verh.	23,0	18,3	17,6	16,4	28,6	26,2	28,3
C_{org}/N_t -Verh.	16,7	15,2	17,6	16,0	16,2	17,2	22,0
KAK_{pot} (mval/100g FB)	5,0	5,9	5,7	7,0	4,0	4,3	4,9

*Mischprobe aus 10 Bohrstockproben

**errechnet aus C_t minus $CaCO_3 - C$

***n.nwb = nicht nachweisbar

gung) von 541 bzw. 314 kg N_t/ha. Die Stickstoffbindung durch die Knöllchenbakterien der Luzerne beträgt demnach 161 (HES-TV/2001) und 232 kg N/ha (HES-LAUBAG/2001). Wesentlich höhere N_t-Gehalte werden durch die Applikation von 7,5 bis 30,0 t TM/ha HES erreicht, so dass bereits 2 Jahre nach Rekultivierungsbeginn die für anhydromorphe sandige Ackerböden im Land Brandenburg typischen N_t-Gehalte von 0,04 bis 0,12% vorliegen (Asmus *et al.*, 1999).

Der positive Einfluss bodenmeliorativer HES-Gaben von $\geq 7,5$ bis 30 t TM/ha auf die Kationenaustauschkapazität und damit auf das Nährstoffspeicherungs- und -transformationsvermögen der humusfreien Kippenböden wird bestätigt.

3.2. Pflanzenerträge

3.2.1. Winterroggen

Der im Versuch *HES I-L/2000* angebaute Winterroggen erbrachte den Nachweis, dass durch den Einsatz von N-modifizierter Braunkohle als Bodenverbesserungsmittel sowohl die Pflanzenerträge erhöht als auch die N-Versorgung der Pflanzen in Verbindung mit einer ungeteilten N-Mineraldüngung von 120 kg/ha im Frühjahr verbessert werden können (vgl. Tabelle VI). Die signifikant höchsten Korn-, Stroh- und TM-Gesamterträge werden bei der Applikation von 7,5 t TM/ha HES (V 4) registriert.

Das im Jahresverlauf höhere N_{min}-Angebot aus dem N-Pool der humusgedüngten Kippenböden fördert vermutlich stärker das vegetative Wachstum. Demzufolge werden mit der Höhe der HES-Gabe die Korn-Stroh-Verhältnisse weiter. Gleichzeitig steigen im Vergleich zu V 1 die N_t-Gehalte sowohl im Korn als auch im Stroh an, ohne dass die Richtwerte des Landes Brandenburg von 1,71% (Korn) bzw. 0,57% (Stroh) erreicht werden (Autorenkollektiv 2000). Auch die N-Entzugswerte von 35,0 (V 1) bis 57,1 kg/ha (V 4) sind vergleichsweise niedrig. Sie zeigen, dass auf den Kippenstandorten zur Gewährleistung einer optimalen N-Versorgung des Winterroggens und zur Erhöhung der N_t-Bodenvorräte deutlich höhere N-Mineraldüngergaben auch in Kombination mit der HES-Anwendung erforderlich sind als auf den Alt-Ackerflächen. Die N-Düngung zu Winterroggen ist zudem in 2, möglicherweise auch in 3 Teilgaben (Vegetationsbeginn, Schosserstadium und zwischen Ährenschieben und Blüte) auszubringen, um einerseits eine N-Überdüngung zu Vegetationsbeginn (Lagerisiko) und andererseits eine ausreichende N-Versorgung bis in die Kornfüllungsphase zu gewährleisten.

Ein Vergleich zwischen den Varianten 1 und 3 bestätigt annähernd das im Gefäßversuch mit Senf ermittelte N-Mineraldüngeräquivalent von 30 bis 35. Beachtenswert sind die bei der Variante 2 erzielten Ergebnisse. Danach sind 1,5 t TM/ha HES (23,6 kg N_{MDÄ}/ha) in Kombination mit einer zeitgleich im Rahmen der Grundmelioration applizierten Harnstoffgabe von 26,4 kg N/ha ertragswirksamer als eine ausschließliche N-Mineraldüngergabe von 50 kg N/ha (V 1).

Der nach einer erneuten HES-Applikation angebaute Winterroggen erbrachte für die Hauptfrucht eine annähernd gleiche, aber statistisch nicht gesicherte Ertragsdifferenzierung zwischen den Varianten 1 bis 4 wie 2001 (vg. Tabelle VI und VII). Auffällig sind die gegenüber 2001 deutlich höheren N_t-Gehalte, N-Entzugswerte sowie engeren Korn-Stroh- und C/N-Verhältnisse des Strohs. Diese entsprechen nunmehr den Richtwerten des Landes Brandenburg, so dass bereits nach 2 Jahren in Verbindung mit der geteilten N-Düngergabe von 150 kg N/ha im Frühjahr eine starke Annäherung an den N-Ernährungsstatus des Winterroggens auf den Altstandorten zu beobachten ist.

TABELLE VI Winterroggen vom 25.07.2001 ($n = 9$) – Rekultivierungsversuch HES I-L/2000
 TABLE VI Winter rye from 25.07.2001 ($n = 9$) – revitalisation trial HES I-L/2000

Variante*	Ertrag (dt TM/ha)**			Korn-Stroh- Verhältnis 1:	N _r -Gehalt (% TS)		N-Entzug (kg/ha)			C/N- Verhältnis Stroh
	Korn	Stroh	Gesamt		Korn	Stroh	Korn	Stroh	Gesamt	
1	19,1	21,1	40,2	1,10	1,41	0,39	26,9	8,1	35,0	131
2 (1,5)	23,4	26,6	50,0	1,09	1,49	0,45	33,9	11,6	45,5	114
3 (3,75)	20,2	27,9	48,1	1,37	1,46	0,42	28,9	11,1	40,0	124
4 (7,5)	24,4	33,6	58,0	1,37	1,57	0,58	37,9	19,2	57,1	96
\bar{x}	21,8	27,3	49,1	1,23	1,48	0,46	31,9	12,5	44,4	116,3
GD 5%	4,45	6,28	10,05	0,149	0,316	0,164	8,20	4,27	11,5	31,5

*in Klammer die HES-Gabe in t TM/ha
 **TM = Trockenmasse atro

TABELLE VII Winterroggen vom 19.07.2002 ($n = 9$) – Rekultivierungsversuch HES I-L/2000
 TABLE VII Winter rye from 19.07.2002 ($n = 9$) – revitalisation trial HES I-L/2000

Variante*	Ertrag (dt TM/ha)**			Korn-Stroh- Verhältnis 1:	N _r -Gehalt (% TS)		N-Entzug (kg/ha)			C/N- Verhältnis Stroh
	Korn	Stroh	Gesamt		Korn	Stroh	Korn	Stroh	Gesamt	
1	18,4	21,5	39,9	1,18	2,01	0,63	37,0	13,3	50,3	78
2 (3,0)	21,6	24,0	45,6	1,08	1,90	0,60	40,4	14,3	54,7	80
3 (7,5)	19,6	22,6	42,2	1,12	2,09	0,74	40,6	16,0	56,6	68
4 (15,0)	23,8	24,5	48,3	1,03	1,99	0,68	47,1	16,6	63,7	74
\bar{x}	20,8	23,2	44,0	1,10	2,00	0,662	41,3	15,0	56,3	75,1
GD 5%	6,12	7,59	13,40	0,101	0,185	0,136	11,63	4,81	15,64	13,5

*in Klammer die HES-Gabe in t TM/ha
 **TM = 100% Trockenmasse

TABELLE VIII Winterroggen vom 19.07.2002 ($n = 6$) – Testversuch HES-LAUBAG/2001, Fruchtfolge A
 TABLE VIII Winter rye from 19.07.2002 ($n = 6$) – test trial HES/LAUBAG/2001, crop rotation A

Variante	Ertrag (dt TM/ha)*			Korn-Stroh- Verh. 1:	N _t -Gehalte (% TS)		N _t -Entzug (kg/ha)			C/N- Verh. Stroh
	Korn	Stroh	Gesamt		Korn	Stroh	Korn	Stroh	Gesamt	
1	23,5	29,2	52,7	1,24	2,07	1,05	47,7	30,9	78,6	44
2	28,2	35,3	63,5	1,26	1,76	0,87	48,1	30,0	78,1	56
3	34,6	43,2	77,8	1,25	1,78	0,71	61,7	30,3	92,0	68
\bar{X}	28,8	35,9	64,7	1,25	1,87	0,88	52,5	30,4	82,9	56
GD 5%	6,61	6,52	12,6	0,09	0,35	0,31	10,59	11,41	18,33	24,4

*TM = 100% Trockenmasse

TABELLE IX Winterweizen vom 25.07.2002 ($n = 6$) – Testversuch HES-LAUBAG/2001, Fruchtfolge B
 TABLE IX Winter rye from 25.07.2002 ($n = 6$) – test trial HES-LAUBAG/2001, crop rotation B

Variante	Ertrag (dt TM/ha)*			Korn-Stroh- Verh. 1 :	N _t -Gehalt (% TS)		N-Entzug (kg/ha)			C/N- Verh. Stroh
	Korn	Stroh	Gesamt		Korn	Stroh	Korn	Stroh	Gesamt	
1	22,1	15,0	37,1	0,67	2,56	0,77	56,8	11,7	68,6	64
2	26,9	18,0	44,9	0,67	2,73	0,72	73,4	12,9	86,3	67
3	28,0	17,6	45,7	0,64	2,58	0,79	70,2	14,3	84,5	65
\bar{X}	25,7	16,9	42,6	0,66	2,62	0,76	66,8	13,0	79,8	65
GD 5%	2,79	3,19	5,47	0,181	0,218	0,216	9,29	5,03	12,54	22,8

*TM = 100% Trockenmasse

Die wesentlich höheren Winterroggenerträge werden bei vergleichbarer Bestandesführung auf den Kipp-Kalklehmsanden des Testversuches *HES-LAUBAG/2001* erzielt (Tabelle VIII). HES-Gaben von 7,5 (V 2) und 15,0 t TM/ha (V 3) haben in Verbindung mit der Gründüngung sehr beachtliche Mehrerträge von rund 5 und 11 dt/ha Körner (atro) bewirkt. Das Korn-Stroh-Verhältnis ist nahezu identisch. Bemerkenswert ist, dass steigende HES-Gaben keine steigenden N_t -Gehalte in den Haupt- und Nebenprodukten verursacht haben, so dass die signifikant höheren Korn- und Stroherträge bei V 3 auf eine bessere Ausnutzung des Boden- und Mineraldüngernstickstoffs zurückzuführen sind. Als weitere Ursache ist die "Humuswirkung" des BVM zu nennen. Da bei V 3 die Richtwerte des Landes Brandenburg für die N_t -Gehalte in der Trockensubstanz von Korn und Stroh (Asmus *et al.*, 1999, Autorenkollektiv 2000) eingehalten werden und die N-Entzüge durch Stroh (kg/ha) nicht höher sind als bei den anderen Varianten, kann hier eine annähernd ertragsoptimale N-Ernährung des Winterroggens unterstellt werden.

3.2.2. Winterweizen

Die Weizenerträge des Testversuches *HES-LAUBAG/2001* belegen, dass die HES-Applikation von 15 (V 2) und 30 t TM/ha (V 3) die Kornerträge auf einem Kipp-Kalklehmsand (Su 2) signifikant steigert (Tab. IX). Besonders hervorzuheben sind das sehr enge Korn-Stroh-Verhältnis von $\emptyset 1 : 0,66$ und die über den Richtwerten liegenden N_t -Gehalte der Haupt- und Nebenprodukte. Die auf Alt-Ackerland mit einer N-Gabe von 150 kg/ha angestrebten Ertragsziele von 55 bis 60 dt/ha werden nicht realisiert, was in dem schlechten Kulturzustand der Kippenböden (Gefüge- und Nährstoffverhältnisse, Bodenbiologie) zu Rekultivierungsbeginn begründet ist. Gleiches gilt für die W.-Weizenerträge des Versuches *HES-TV/2001*. Auf dem Kipp-Sandlehm (Sl 4) waren die Kornerträge aufgrund stärkerer Bodenverdichtungen und dadurch bedingter Näscheschäden im Frühjahr 2002 deutlich niedriger. Die im Vergleich zu V 1 signifikant höheren Kornerträge wurden nur bei der Variante 3 (15 t TM/ha HES) mit 20,6 dt/ha erzielt.

3.2.3. Speisekartoffeln

Der Anbau von Speisekartoffeln als erstes Glied einer Rekultivierungsfruchtfolge ist ein "Härtetest" für die Eignungsprüfung N-modifizierter Braunkohle als Humusdüngemittel. Im Versuch *HES-TV 2001* hat bereits die Anwendung von 7,5 t TM/ha HES (118 kg N_{MDA} /ha) bei V 2 signifikant höhere Knollen- und Stärkeerträge bewirkt als die Mineraldüngergabe von 177,3 kg N/ha (vgl. Tabelle X). Während die Stärkeerträge mit der HES-Gabe ansteigen, werden die höchsten Knollenerträge bei einer HES-Gabe von 15,0 t TM/ha (V 3) registriert.

Die mit der mittelfrühen Kartoffelsorte "Adretta" erzielten Ergebnisse werden tendenziell durch die mittelspäte Kartoffelsorte "Afra", Versuch *HES-LAUBAG/2001* (Fruchtfolge B), bestätigt (Tabelle XI). Auch hier bewirken HES-Gaben von 15 t TM/ha (V 2) die signifikant höchsten Mehrerträge und solche von 30 t TM/ha (V 3) einen signifikanten Ertragsrückgang. Auffällig sind die mit der Humusgabe steigenden Nährstoffgehalte der Kartoffelknollen, was nicht nur auf die Konzentrationsanstiege infolge geringerer Biomassebildung zurückgeführt werden kann. Die N-Konzentrationen liegen generell über den Normwerten von 1,25% TM (Schmalfuss, 1969) bzw. 0,35% FM (Autorenkollektiv, 2000). Die K-Richtwerte werden mit 1,90% TM (Schmalfuss, 1969) bzw. 0,50% FM (Autorenkollektiv, 2000) angegeben und somit deutlich

TABELLE X Kartoffelerträge der Sorte "Adretta" vom 06.09.2001 ($n = 10$) – Versuch HES-TV/2001, Fruchtfolge A
 TABLE X Potatoes harvest results of the variety "Adretta" from 06.09.2001 ($n = 10$) – test trial HES-TV/2001, crop rotation A

Variante	Knollenertrag dt/ha		Stärkegehalt (% FM)	Stärkeertrag (dt/ha)
	FM*	TM**		
1	99,7	23,4	16,48	16,2
2	135,7	31,2	15,81	21,4
3	150,6	34,2	15,34	23,3
4	138,9	34,1	17,45	24,2
\bar{X}	131,2	30,7	16,27	21,3
GD 5 %	26,31	6,40	1,06	4,55

*FM = Frischmasse

**TM = 100% Trockenmasse

überschritten. Die P-Versorgung ist bei allen Varianten unzureichend (Richtwert: 0,22% FM), während die Ca- und Mg-Gehalte der Knollen bei der Variante 1 (ohne HES) unter und bei der Variante 3 (30 t TM/ha) über den Normwerten von 0,071% Ca (Schmalfluss 1969) und 0,08% Mg in der Trockenmasse (Autorenkollektiv, 2000) liegen.

Die höheren N-Gehalte verzögern offensichtlich den Entwicklungsabschluss der mittelspäten Kartoffelsorte, und die Pflanzen zeigen, begünstigt durch die hohen K-Gehalte einen höheren Wasser- und demzufolge niedrigeren Trockensubstanz- sowie Stärkegehalt. Da das Reaktionsoptimum der Kartoffel im schwach sauren Bereich liegt, könnte die schwach alkalische Bodenreaktion das verstärkte Auftreten von freiem NH_3 verursacht haben. Ammoniak schädigt als starkes Plasmagift die Pflanzen und wäre so für den Ertragsrückgang bei der Variante 3 (30 t TM/ha HES), hier sind höhere NH_4^+ -Freisetzungsraten zu erwarten (Katzur *et al.*, 2002b), verantwortlich. Inwieweit dieser Sachverhalt auch für V 4 (30 t TM/ha HES) des Versuches HES-TV-L/2001 (vgl. Tabelle X) zutrifft, kann aufgrund fehlender Nährstoffanalysen nicht geklärt werden.

3.2.4. Luzerne

Die als erstes Fruchtfolgeglied auf der Versuchsfläche HES-TV/2001 angebaute Luzerne erbrachte im Aussaatjahr keine nutzbaren Pflanzenerträge. Vermutlich haben die sehr hohen N-Gaben (vg. Tabelle II) der Entwicklung sowohl der Luzerne als auch der symbiotisch lebenden Knöllchenbakterien geschadet. Im ersten Hauptnutzungsjahr wirkten die bodenmeliorativen HES-Gaben von 7,5 (V 2) bis 30,0 t TM/ha (V 4) nicht ertragssteigernd (vg. Tabelle XII). Die TM-Erträge der einzelnen Schnitte lassen jedoch eine variantenabhängige Differenziertheit erkennen. Die Varianten 2 bis 4 weisen beim 1. Schnitt geringfügig höhere TM-Erträge als V 1 auf, während sie beim 2. Schnitt und die Varianten 2 bis 3 auch noch beim 3. Schnitt durch signifikante Mindererträge von der Vergleichsvariante unterschieden sind. Vermutlich sind beim 2. und 3. Schnitt die negativen Effekte der hohen N-Mineraldüngergabe bei V 1 von 177,3 kg/ha behoben, so dass nunmehr ein normales Pflanzenwachstum möglich ist.

Innerhalb der HES-Varianten nehmen mit steigender N_1 -Gabe die Erträge des 1. Schnittes nur unwesentlich ab und die des 2. und 3. Schnittes sowie die Gesamterträge zu. Offensichtlich beeinflusst die Höhe der HES-Gabe die N-Mineralisation und N-

TABELLE XI Kartoffelerträge der Sorte "Afra" vom 02.10.2001 (n = 10) – Versuch HES-Laubag/2001, Fruchtfolge B-
TABLE XI Potatoes harvest results of the variety "Afra" from 02.10.2001 (n = 10) – test trial HES-Laubag/2001, crop rotation B-

Variante	Knollenertrag (dt/ha)		TS-Gehalt (% FM)	Stärke- gehalt*** (% FM)	Nährstoffgehalte (g/kg TS)					C/N- Verh. Knolle
	FM*	TM**			N _t	Ca	Mg	K	P	
1	131,6	32,3	24,61	17,4	16,0	0,55	0,95	22,2	1,61	27,4
2	147,1	34,7	23,60	16,4	19,8	0,81	1,13	24,6	1,83	22,0
3	121,3	27,4	22,70	15,4	20,8	1,54	1,26	25,4	1,83	20,8
\bar{X}	133,3	31,5	23,64	16,4	18,9	0,97	1,12	24,1	1,76	23,4
GD 5%	23,22	5,87	1,218	n.b.	1,34	0,168	0,061	0,79	0,132	2,11

*FM = Frischmasse

**TM = 100% Trockenmasse

***Nur an einer Mischprobe bestimmt

TABELLE XII Luzernerträge, Nährstoffgehalte in der Pflanzensubstanz und Nährstoffentzüge im Jahr 2002 (n = 6) – Versuch HES-TV/2001, Fruchtfolge B
TABLE XII Alfalfa harvest results, nutrient content of plant material and nutrient extractions in 2002 (n = 6) – test trial HES-TV/2001, crop rotation B

Variante	Pflanzenerträge (dt TM/ha)*				Ø Nährstoffgehalte** in der TM						Gesamt-Nährstoffentzug (kg RN/ha)					
	Schnitte			gesamt	N (%)	Ca (%)	K (%)	Mg (‰)	S (‰)	P (‰)	N	Ca	K	Mg	S	P
	1.	2.	3.													
1	27,9	26,7	40,9	95,5	3,22	1,41	2,98	1,62	2,56	2,23	307,4	134,8	284,6	15,5	24,6	21,4
2	31,9	19,1	35,0	86,0	3,54	1,43	3,15	1,77	2,88	2,36	304,0	123,0	271,2	15,2	24,8	20,4
3	31,9	21,9	33,0	86,8	3,33	1,41	3,19	1,71	2,98	2,50	288,3	121,8	276,9	14,7	25,8	21,7
4	30,7	22,6	42,3	95,6	3,15	1,27	3,13	1,56	2,98	2,38	301,1	121,5	299,2	14,9	28,6	22,7
\bar{X}	30,6	22,6	37,8	91,0	3,31	1,38	3,11	1,66	2,85	2,37	300,2	125,2	282,9	15,1	25,9	21,5
GD 5%	4,49	3,77	5,45	10,48	0,158	0,075	0,087	0,093	0,274	0,136	31,70	14,44	33,57	1,57	4,25	2,80

*TM = 100% Trockenmasse

**gewogenes Mittel

**n.b. = nicht berechnet

Immobilisation im Jahresverlauf sehr differenziert (Katzur *et al.*, 2002b). Ein weiterer Vergleich zeigt, dass bei V 4 die Erträge des 3. Schnittes am höchsten sind und der TM-Gesamtertrag dem der Vergleichsvariante 1 entspricht. Demnach hat die sehr hohe N_t -Gabe von 1.576 kg/ha (473 kg $N_{MD\ddot{A}}$ /ha) keinen dauerhaft negativen Einfluss auf das Wachstum der Luzerne ausgeübt. Das belegen auch die N-Gehalte der Trockensubstanz, die mit $\bar{\varnothing}$ 3,15% deutlich unter den Normwerten von 3,50% N (Autorenkollektiv, 2000) liegen.

Die HES-Düngung beeinflusst auch andere Nährelementgehalte. Auf den humusgedüngten Parzellen der Variante 4 (30 TM/ha HES) sind bei vergleichbarem TM-Gesamtertrag die K-, S- und P-Gehalte statistisch gesichert höher und die Ca-Gehalte signifikant niedriger als bei der Variante ohne HES (V 1). Innerhalb der HES-Varianten nehmen mit steigender Humusgabe die N-, Ca- und Mg-Konzentrationen in der Trockensubstanz deutlich ab, während die S- und P-Gehalte z.T. signifikant zunehmen. Im Hinblick auf die Nährstoffentzugswerte (kg RN/ha) bestehen zwischen den Varianten keine deutlichen Unterschiede (vgl. Tabelle XII).

Die Luzerneerträge auf dem Kipp-Kalklehmsand des Testversuches *HES-LAUBAG/2001* bestätigen im Prinzip die obigen Ergebnisse, so dass auf eine detaillierte Darlegung dieser Versuchsergebnisse verzichtet werden konnte.

4. SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Die N-modifizierte Braunkohle ist ein wertvolles Bodenverbesserungsmittel, das in Gaben von $\geq 7,5$ bis 30 t TM/ha zur nachhaltigen Verbesserung der C_{org} - (Dauerhumus) und N_t -Gehalte sowie Austauschkapazität humusfreier Kippenböden eingesetzt werden kann.
- Nach pflanzlicher und mikrobieller Verwertung der mit dem Humusdüngestoff zugeführten N_{min} -Gabe und leichter hydrolysierbaren N-Bindungsarten verbleibt nur noch der fest organisch gebundene Stickstoff ($N_{fог}$) des HES im Boden. Dieser Stickstoff wird nur sehr langsam mikrobiell freigesetzt und bildet eine langsam fließende N-Quelle.
- Nach Aufbrauch des gelösten und leichter mobilisierbaren Stickstoffs aus dem Humusdüngestoff kommt es zu einer geringfügigen Erweiterung des C/N-Verhältnisses, die, wie in der landwirtschaftlichen Rekultivierungspraxis üblich, durch eine entsprechende N-Mineraldüngergabe zu kompensieren ist.
- Durch den Einsatz der N-modifizierten Braunkohle als Bodenverbesserungsmittel werden die N-Grunddüngergaben substituiert, höhere N_{min} -Gehalte in der behandelten Bodenschicht initiiert und die bei den jeweiligen Kippsubstrattypen anzustrebenden C_{org} - und N_t -Gehalte wesentlich früher erreicht.
- Das in Gefäßversuchen für den Stickstoff aus dem HES bestimmte Mineraldüngeräquivalent von 30 bis 35 wird durch die Freilandversuche mit Winterroggen bestätigt.
- Die bodenverbessernden Effekte der HES-Applikation bewirken signifikante Ertragssteigerungen bei Winterroggen, Winterweizen und mittelfrühen Speisekartoffeln der Sorte "Adretta", während bei Luzerne und der mittelspäten Speisekartoffel "Afra" keine bzw. keine deutlichen Mehrerträge erzielt werden.
- Die HES-Anwendung im Frühjahr in Kombination mit einer Gründüngung ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand die optimale Vorbereitungsvariante für den

nachfolgenden Getreideanbau. Beachtliche bodenmeliorative Effekte bewirkt die HES-Düngung in Kombination mit dem Luzerneanbau.

- Die Humusdüngung beeinflusst die Nährstoffversorgung der nachfolgend angebauten Kulturpflanzen. Auf HES-gedüngten Kippenböden werden bei vergleichbarem TM-Gesamtertrag der Luzerne signifikant höhere K-, S- und P- sowie signifikant geringere Ca-Gehalte in der Pflanzensubstanz bestimmt als auf den ausschließlich mineralgedüngten. Andererseits nehmen mit steigenden HES-Gaben die \emptyset N_t-, Ca- und Mg-Gehalte ab und die von S und P signifikant zu.
- Die bisherigen Versuchsergebnisse lassen vermuten, dass durch ein verbessertes N-Mineraldüngungsregime zur Feldfrucht und durch Tiefenlockerung der bis in 100 cm Tiefe verfestigten Kippenböden noch weitere Ertragssteigerungen möglich sind. Die begonnenen Feldversuche sind deshalb unter Berücksichtigung der bisherigen Ergebnisse weiterzuführen.

References

- Ag Boden. (1996) Bodenkundliche Kartieranleitung. 4. Aufl., Nachdruck, Hannover.
- Asmus, F. *et al.* (1999) Effektive und umweltverträgliche organische Düngung. Hrsg.: Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten des Landes Brandenburg.
- Autorenkollektiv. (1982) Rekultivierung von Kippen des Braunkohlenbergbaues. Markkleeberg.
- Autorenkollektiv. (2000) Rahmenempfehlungen zur Düngung 2000 im Land Brandenburg. Hrsg.: Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg.
- Fischer, K., *et al.* (1999) Organische Düngemittel sowie Verfahren zu seiner Herstellung und Verwendung. Az 198 590 68. 7–41, Anmeldungs-Nr. 2661 977.
- Katzur, J. *et al.* (2002a) Kennwerte und Eigenschaften der auf Braunkohlenbasis durch oxidative Ammonolyse hergestellten Humusdüngestoffe. Arch. Acker-Pfl. Boden, 48, 637–646.
- Katzur, J. *et al.* (2002b) Auswirkungen der durch oxidative Ammonolyse chemisch veränderten Braunkohle auf die Bodenbiologie. Arch. Acker-Pfl. Boden, 48, 647–661.
- Katzur, J. *et al.* (2003) Düngewirkung der N-modifizierten Braunkohle und ihre Auswirkungen auf Pflanze, Boden und N-Auswaschungsverluste. Arch. Acker- Pfl. Boden, 49, 61–75.
- Schmalzfuss, K. (1969) Pflanzenernährung und Bodenkunde. 11. Auflage, S. Hirzel Verlag Leipzig.
- Weber, E. (1967) Grundriss der biologischen Statistik. 6. Auflage, VEB Gustav Fischer Verlag Jena.