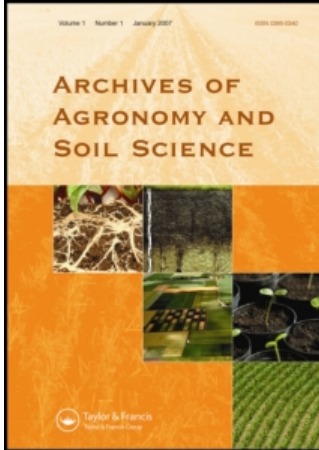


This article was downloaded by:[Schulz, Elke]  
On: 12 October 2007  
Access Details: [subscription number 746184537]  
Publisher: Taylor & Francis  
Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954  
Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



## Archives of Agronomy and Soil Science

Publication details, including instructions for authors and subscription information:  
<http://www.informaworld.com/smpp/title~content=t713453776>

### Landwirtschaftliche Testversuche zur Verwendung von N-modifizierter Weichbraunkohle als Humusdüngestoff bei der Rekultivierung von Kippenböden des Braunkohlebergbaus

Joachim Katur<sup>a</sup>; Lutz Böcker<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften e.V. (FIB), Finsterwalde, Germany

Online Publication Date: 01 August 2007

To cite this Article: Katur, Joachim and Böcker, Lutz (2007) 'Landwirtschaftliche Testversuche zur Verwendung von N-modifizierter Weichbraunkohle als Humusdüngestoff bei der Rekultivierung von Kippenböden des Braunkohlebergbaus', Archives of Agronomy and Soil Science, 53:4, 355 - 389

To link to this article: DOI: 10.1080/03650340701253343

URL: <http://dx.doi.org/10.1080/03650340701253343>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.informaworld.com/terms-and-conditions-of-access.pdf>

This article may be used for research, teaching and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, re-distribution, re-selling, loan or sub-licensing, systematic supply or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

# Landwirtschaftliche Testversuche zur Verwendung von N-modifizierter Weichbraunkohle als Humusdüngestoff bei der Rekultivierung von Kippenböden des Braunkohlebergbaus

JOACHIM KATZUR & LUTZ BÖCKER

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

*(Received 24 October 2006; accepted 1 February 2007)*

## Zusammenfassung

In drei Freilandversuchen auf Kippenflächen des Braunkohlebergbaus und einem Gewächshausversuch wurden die bodenverbessernden und ertragssteigernden Effekte des Einsatzes von N-modifizierter Weichbraunkohle als Humusersatzstoff (HES) in Kombination mit einer differenzierten N-Mineraldüngung zur Frucht und bei unterschiedlichen Anlauffruchtfolgen der landwirtschaftlichen Rekultivierung untersucht. Danach ist die chemisch veränderte Weichbraunkohle ein wertvolles organisches Bodenverbesserungsmittel, das in Gaben von  $\geq 75$  bis  $300 \text{ dt TM ha}^{-1}$  zur nachhaltigen Verbesserung der  $C_{\text{org}}$ - und  $N_{\text{t}}$ -Bodenvorräte, Austauschkapazitäten sowie des Nährstoffspeicherungs- und -transformationsvermögen humusfreier Kippenböden eingesetzt werden kann. Die OS- und ROS-Bodenvorräte (OS, organische Substanz; ROS, reproduktionswirksame organische Substanz) sind in den HES-gedüngten Kippenböden stets höher als bei den Vergleichsvarianten (ohne HES bzw. mit  $300 \text{ dt ha}^{-1}$  Stallmist) und steigen mit der Höhe der HES-Gabe an. Dadurch werden die standort- und nutzungstypischen  $C_{\text{org}}$ -Gehalte wesentlich schneller erreicht als über die Wurzel- und Ernterückstände der Rekultivierungsfruchtfolgen. Bodenchemische und ertragskundliche Untersuchungen bestätigen, dass  $300 \text{ dt ha}^{-1}$  Stallmist im Hinblick auf die Humusersatzleistung durch etwa  $30 \text{ dt ha}^{-1}$  HES ersetzt werden können. Die bodenverbessernden Effekte der HES-Düngung bewirken von der Fruchtfolge respektive Pflanzenart abhängige Ertragssteigerungen.

**Schlüsselwörter:** *Landwirtschaftliche Rekultivierung, N-modifizierte Braunkohle, Humusverhältnisse, Nährstoffverhältnisse, Pflanzenertrag*

## **Agricultural tests for using N-modified soft brown coal as humus fertilizer for re-cultivating dump soils left by brown coal mining**

### **Abstract**

Soil improvement and yield increase effects of N-modified soft brown coal as humus substitution agent (HES) combined with a specific N-mineral fertilization while fruiting and combined with different cultivation crop rotation of agricultural re-cultivation were investigated in three field tests on dumps of brown coal mining area and in one greenhouse test. Soft brown coal chemically modified is a valuable organic soil improving agent, which can be used in application amounts of  $\geq 75$  to  $300 \text{ dt dry mass ha}^{-1}$  for a sustainable improvement of  $C_{\text{org}}$ - and  $N_t$ -soil stock, exchange capacity, for nutrition storing and nutrition transformation capacity in humus-free dump soils. HES-fertilized dump soils contain higher amounts of organic matter and effective reproduction of organic matter than comparable variants (variants without HES or with  $300 \text{ dt ha}^{-1}$  stable dung, respectively). Further, deposits increase equivalent to the added amount of HES. Consequently, site- and utilization-typical  $C_{\text{org}}$ -contents are reached faster than through root and harvest residues of re-cultivation crop rotations. Chemical analysis of soil and yield investigations confirm that  $300 \text{ sdt ha}^{-1}$  stable dung can be replaced by  $30 \text{ dt ha}^{-1}$  HES in terms of humus replacement benefit. The soil improving effects cause yield improvements depending on crop rotation and plant species.

**Keywords:** *Agricultural re-cultivation, N-modified brown coal, humus ratios, nutrition ratios, plant yield*

### **Einleitung und Problemstellung**

Die Humusanreicherung ist ein wichtiges Ziel bei der Rekultivierung der in der Regel humusfreien bzw. humusarmen Kippenböden des Braunkohlenbergbaues. Dadurch sollen die ökologischen Bodenfunktionen in ihrer Gesamtheit, insbesondere das Speicherungs- und Transformationsvermögen der Böden für Nährstoffe und Wasser und damit ihre Eignung als Pflanzenstandort wieder hergestellt bzw. dauerhaft verbessert werden.

Die organische Substanz des Bodens (Bodenhumus) wird nach dem Grad ihrer Umwandlung in Streustoffe (Grobhumus) und Huminstoffe (Feinhumus) unterteilt. Die Streustoffe (Nichthuminstoffe) sind überwiegend leicht zersetzbar und dienen den Bodenmikroorganismen als Nahrung (Nährhumus) (Scheffer & Schachtschabel 1992). Die Huminstoffe sind hochmolekulare, relativ stabile organische Verbindungen (Kolloide  $< 2 \mu\text{m}$  Teilchengröße), die in Fulvosäuren, Huminsäuren (Hymatomelansäure, Braun- und Grauhuminsäuren) und Humine (gealterte, inaktiv gewordene Huminsäuren und Ton-Humus-Komplexe) unterteilt werden. Die Huminsäuren stellen die wichtigste Gruppe innerhalb der Huminstoffe dar und sind stabiler als Fulvosäuren. Die Huminstoffe (Fulvo- und Huminsäuren) vermögen, aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche, Wasser und andere Moleküle sowie Ionen reversibel anzulagern und mit den reaktionsfähigen Tonfraktionen stabile organo-mineralische Komplexe zu bilden. Die Huminstoffe haben daher sowohl für die Kationen- ( $KAK_{\text{pot}}$ ) und Anionenaustauschkapazität (AAK) als auch für die Pufferung und Nährstoffbindung vor allem der Sandböden eine große Bedeutung.

Die Huminsäuren und Humine sind mikrobiell schwer abbaubar und gehören wie alle schwer zersetzbaren organischen Bodenstoffe zum Dauerhumus.

In den Böden verlaufen Humusakkumulation und Huminstoffbildung sehr langsam, so dass für das Erreichen der an den Standort angepassten Humusvorräte mehrere Jahrzehnte erforderlich sind. Deshalb ist die zusätzliche Zufuhr von organischen Düngestoffen bzw.

pflanzlichem Material zum Boden Bestandteil vieler Rekultivierungsverfahren. Vorteilhaft sind organische Düngestoffe, aus denen die größte Menge an Dauerhumus (Fulvo- und Huminsäuren, Humine) hervorgeht oder die diesen bereits in großen Mengenanteilen enthalten (Schröder et al. 1987). Den weitaus größten Anteil an Huminstoffen besitzen die Weichbraunkohlen mit bis zu 98% der asche- und wasserfreien Substanz (Kopp 1969; Marcusson 1927). Aufgrund dessen können sie wie die kohligen Beimengungen tertiärer Sedimente Humusersatzfunktionen übernehmen (Katzur et al. 2002a). Nachteilig sind ihre geringen  $N_t$ -Gehalte von durchschnittlich 0,6% und weiten C/N-Verhältnisse von meist  $> 90$ . Von daher sind Versuche zur Regenerierung der funktionellen Gruppen fossiler Huminstoffe sowie zur Anlagerung und zum Einbau von Stickstoff an bzw. in die Huminstoffmoleküle der Braunkohle plausibel.

Die Hauptkomponente der Weichbraunkohle ist das mehr oder weniger modifizierte Lignin der früheren Pflanzen (Naundorf et al. 2000). Es entstand während des Inkohlungsprozesses durch Zersetzung und biochemische Umwandlung (Humifizierung) und bildet die Grundmasse der Weichbraunkohle, die auch als Dauerhumus einzustufen ist. Die ligninbürtigen (Kohle-) Huminstoffe werden unter natürlichen oxidativen Bedingungen vornehmlich durch Kondensationsreaktionen zwischen den phenolischen Substanzen und N-haltigen Verbindungen gebildet (Flaig 1968). Die N-Modifizierung von Lignin lässt sich auch durch eine oxidative Ammonolyse erreichen und wird als künstliche Humifizierung bezeichnet (Flaig et al. 1959).

Die Weichbraunkohle enthält außer den Huminstoffen noch wenig zersetzte, deutlich erkennbare Pflanzenreste sowie Spaltprodukte von Streustoffen (Lignin, Polysaccharide usw.) Diese lassen sich nach der klassischen Untersuchungsmethode nicht mit kalter Natronlauge extrahieren und werden deshalb bei den in kalter Natronlauge unlöslichen Anteilen der Huminstoffe miterfasst, obwohl sie nicht zu den Huminen, sondern zu den Ausgangsmaterialien bzw. Ausgangsstoffen der Huminstoffbildung gehören.

Auf der Basis von Weichbraunkohle lässt sich mittels oxidativer Ammonolyse in wässrig-ammonikalischer Lösung/Suspension ein neuartiges organisches Düngemittel herstellen, das patentrechtlich geschützt ist (Fischer et al. 1999) und im Weiteren auch als Humusersatzstoff (HES) bezeichnet wird. Dieser verfügt über potentielle Kationenaustauschkapazitäten von  $547 \pm 164 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1} \text{ TS}$  und enthält stabil über 5,2 bis 6,2% Stickstoff in unterschiedlichen Bindungsarten mit zeitlich differenzierter Freisetzung (Katzur et al. 2002b). Die realisierten N-Anreicherungen und C/N-Verhältnisse von  $\leq 12,0$  sind sehr beachtlich, wie ein Vergleich mit den  $N_t$ -Gehalten der verschiedenen Huminstofffraktionen zeigt. Beispielsweise werden die  $N_t$ -Gehalte der Fulvosäuren mit 0,5 bis 2,0% (C/N  $> 20-100$ ) und die der N-reichen hochwertigen Grauhuminsäuren mit 5 bis 8% (C/N  $> 7-12$ ) angegeben (Scheffer & Schachtschabel 1992).

Die Quantifizierung der N-Düngewirkung ergab Mineräldüngeräquivalente ( $N_{MD\ddot{A}}$ ) von 30 bis 35, d.h. 30 bis 35 kg N Mineräldünger haben die gleiche Ertragswirkung wie 100 kg N aus dem Humusdüngestoff (Katzur et al. 2003a). Im Durchschnitt enthält eine Tonne HES lutro rund 42 kg Gesamt-Stickstoff ( $N_t = 5,78\% \text{ TS}$ ), davon sind 24 kg N festorganisch gebunden ( $N_{\text{fog}} = 57,1\% N_t$ ) und 14 kg N im Anwendungsjahr ertragswirksam ( $N_{MD\ddot{A}} = 32,5\% N_t$ ). Die  $N_{\text{min}}$ -Gehalte liegen bei nur  $3 \text{ kg t}^{-1} \text{ HES lutro}$  ( $N_{\text{min}} \triangleq 7,18\% \text{ von } N_t$ ). Das MDÄ für Stickstoff aus dem HES ist in der Fruchtfolge nur unwesentlich höher als im Anwendungsjahr. Ursache ist die hohe Abbauresistenz der ligninbürtigen „Kohle“-Huminstoffe, was in Langzeit-Inkubationsversuchen nach dem raschen Verbrauch der leicht verwertbaren C-Quellen und Nährstoffe zur C-Limitierung der mikrobiellen Population führt (Katzur et al. 2002c). Demzufolge ist der fest organisch gebundene HES-Stickstoff nur über einen längeren Zeitraum erschließbar.

Die Humusreproduktionswirksamkeit ist bei der N-modifizierten Weichbraunkohle aufgrund ihrer hohen Gehalte an organischer Trockenmasse ( $\geq 68\%$ ) und Huminstoffen ( $\geq 60\%$  organische TS) sehr hoch. Beispielsweise beträgt der aus dem Vergleich der Humifizierungsraten der organischen Substanz aus Stallmist (20%) und humifizierter Weichbraunkohle ( $\geq 60\%$ ) abgeleitete Humusreproduktionskoeffizient (Asmus et al. 1999)  $\geq 3$ . Das heißt, die Humusersatzleistung der chemisch veränderten Weichbraunkohle ist bei Zufuhr vergleichbarer Mengen an organischer Substanz zum Boden mindestens dreimal so hoch wie bei Stallmist (Rottemist) als Bezugsbasis mit dem Koeffizienten 1 ( $20\% / 60\% = 1/x$ ;  $x = 3$ ). Katur et al. (2003c) konnten nachweisen, dass durch die oxidative Ammonolyse die Fulvosäure- und Huminsäuregehalte in der organischen Substanz der Weichbraunkohle von 5,2 und 27,5% auf 40,7 und 40,5% angestiegen sind, während sich die Anteile der Humine von 60,2 auf 7,8% und die der Bitumen von 6,1 auf 4,8% verringerten. Demnach wäre der Humusreproduktionskoeffizient der organischen Trockenmasse aus der chemisch veränderten Braunkohle sogar mit ca. 4,0 ( $((40,7\% + 40,5\%)/20\% = 4,06$ ) anzusetzen, was jedoch aus Gründen der Bilanzierungssicherheit verworfen wird.

Die N-modifizierte Weichbraunkohle ist arm an Schadstoffen und kann deshalb auch wegen der geringen  $N_{\min}$ -Gehalte problemlos zur nachhaltigen Verbesserung der über die organische Substanz beeinflussbaren Bodenfruchtbarkeitsmerkmale eingesetzt werden (Katur et al. 2003a).

Die potentiellen Einsatzgebiete des Humusersatzstoffes sind sehr breit gefächert. Er kann als universales, nachhaltig wirkendes organisches Bodenverbesserungsmittel mit N-Düngewirkung im Anwendungsjahr in Land- und Forstwirtschaft sowie im Garten- und Landschaftsbau verwendet werden. Spezielle Einsatzgebiete sind die Begrünung und Aufforstung von Ödland, Residualflächen und Industriebalden, die Herstellung von Bodensubstraten für Pflanzenanzucht, Produktion von Gemüse und Dachbegrünung sowie die Sanierung von durch Bodenabtrag und Übernutzung geschädigten Böden (Bekämpfung der Wüstenbildung).

Das Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften Finsterwalde wurde 2001 von der Lausitzer Braunkohlen AG (LAUBAG), später Vattenfall Europe Mining AG, beauftragt, im Tagebaubereich Welzow-Süd (Fläche WW 034) einen Testversuch (HES-LAUBAG/2001) zum Einsatz von chemisch veränderter Weichbraunkohle bei der landwirtschaftlichen Rekultivierung von Kippenflächen anzulegen. Hier befinden sich zwei weitere Freilandversuche zu derselben Problematik. Der eine Versuch (HES I-L/2000) wurde im Rahmen des BMBF-Förderprojektes „Humusersatzstoffe“ (Katur et al. 2003b) angelegt und nach 2002 mit Unterstützung der Niederlausitzer Sanierungsgesellschaft mbH (NSG) Großräschen weitergeführt. Der zweite Versuch (HES II-L/2003) wurde erst 2003 ebenfalls mit Unterstützung der NSG begonnen und durch einen HES-Steigerungsversuch unter Glas (HES-NSG/Burg 2003) zwecks Substitution von Stallmist komplettiert.

Im Folgenden werden schwerpunktmäßig die mehrjährigen Ergebnisse des Freilandversuches „HES-LAUBAG/2001“ vorgestellt und durch die Teilergebnisse der übrigen Versuche zur komplexen Wirkung der organischen Düngemittel in Kombination mit einer N-Mineraldüngung ergänzt.

## Methodik

Im Versuch „HES-LAUBAG/2001“ werden die Einflüsse mengenmäßig differenzierter HES-Gaben auf Bodenentwicklung und Pflanzenertrag am Beispiel von drei Anlauffruchtfolgen untersucht (Tabelle I). Die HES-Gaben und Mineraldüngemittel wurden nach einer

Tabelle I. Varianten und Angaben zur Durchführung des landwirtschaftlichen Rekultivierungsversuches „HES-LAUBAG/2001“<sup>ca</sup>.  
(Table I. Variants and details about the agricultural re-cultivation test 'HES-LAUBAG/2001'<sup>ca</sup>.)

Grundmелиoration (9. September 2001)							
Variante	Fruchtfolge	HES-Gabe (83,3% TS; 64,9% C <sub>i</sub> ; 5,253% N <sub>i</sub> )		Mineraldüngung (kg RN ha <sup>-1</sup> )			
		t TM ha <sup>-1</sup>	kg N <sub>t</sub> ha <sup>-1</sup>	N <sub>MDA</sub> ha <sup>-1</sup>	N	P	K
1	A, C	-	-	-	80	160	160
	B	-	-	-	160	-	160
2	A, C	7,5	394	118	-	160	160
	C	15,0	788	236	-	160	160
3	A, C	15,0	788	236	-	160	160
	B	30,0	1576	473	-	160	160

Versuchsdurchführung					
Fruchtfolge	Fruchtfolgeglied	Aussaat		Erntetermin	Bemerkungen <sup>b</sup>
		Menge	Termin		
A	Senf	30 kg ha <sup>-1</sup>	10. 5. 2001	14. 8. 2001	Gründüngung (Kreiselege) 100 kg P ha <sup>-1</sup> , 150 kg K ha <sup>-1</sup> und Saatbettbereitung (Kreiselege)
	Winterroggen „Nikita“	165 kg ha <sup>-1</sup>	9. 10. 2001	25. 7. 2002	
	Winterweizen „Ritmo“	172 kg ha <sup>-1</sup>	11. 10. 2002	29. 7. 2003	12. 3. 2002
				26. 3. 2003:	7. 5. 2002:
				27. 3. 2003	10. 9. 2002

(continued)

Tabelle I. (Continued).

Fruchtfolge	Fruchtfolgeglied	Versuchsdurchführung			Bemerkungen <sup>b</sup>
		Aussaat		Erntetermin	
		Menge	Termin		
	Wintergerste „Franziska“	149 kg ha <sup>-1</sup>	17. 9. 2003	9. 7. 2004	16. 9. 2003 100 kg P ha <sup>-1</sup> , 100 kg K ha <sup>-1</sup> und Saatbereitung (Kreiselegge) 80 kg N ha <sup>-1</sup> 50 kg N ha <sup>-1</sup> Stoppelbearbeitung Fräsen Pflügen 120 kg N ha <sup>-1</sup> Häufeln, Striegeln, manuelle Pflege Spritzung Phytophthora, Käfer (Tritane, Karate) Fräsen, Pflügen je 50 kg N, P und K pro Hektar Häufeln, Striegeln, manuelle Pflege vorbeugende Spritzung gegen Phytophthora (1,8 kg ha <sup>-1</sup> Dithone, Neo Toc)
	Kartoffel „Adretta“	37800 Stück ha <sup>-1</sup>	13. 4. 05	1. 9. 2005	18. 3. 2004 12. 4. 2004 24. 9. 2004 22. 3. 2005 11. 4. 2005 13. 4. 2005 28. 5. 2005 30. 6. 2005 und 18. 7. 2005
	Winterweizen „Akteur + Capo“	170 kg ha <sup>-1</sup>	10. 10. 2005		22. 9. 2005
B	Kartoffel „Afra“	45000 Stück ha <sup>-1</sup>	9. 5. 2001	2. 10. 2001	14. 6. 2001 11. 7. 2001 20. 9. 2001 Krautabtötung (mechanisch)

(continued)

Tabelle I. (Continued).

Fruchtfolge	Fruchtfolgeglied	Versuchsdurchführung			Erntetermin	Bemerkungen <sup>b</sup>
		Menge	Termin	Aussaat		
	Winterweizen „Bandit“	180 kg ha <sup>-1</sup>	9. 10. 2001	25. 7. 2002	2. 10. 2001	100 kg P ha <sup>-1</sup> , 150 kg ha <sup>-1</sup> und Saatbereitung
	Luzerne „Diana“	32 kg ha <sup>-1</sup> (geimpft)	11. 9. 2002	Totalausfall	12. 3. 2002 7. 5. 2002 29. 7. 2002 10. 9. 2002	100 kg N ha <sup>-1</sup> 50 kg N ha <sup>-1</sup> Stoppelumbruch 50 kg N ha <sup>-1</sup> , 50 kg P ha <sup>-1</sup> 150 kg K ha <sup>-1</sup> und Saatbereitung
	Luzerne „Europa“	32 kg ha <sup>-1</sup> (geimpft)	10. 4. 2003 (Neuan-saat)	2003 kein Ertrag	27. 3. 2003 9. 9. 2003	Umbruch Schröpschnitt, Trockenheit
	Luzerne „Diana“	30 kg ha <sup>-1</sup> (geimpft)	10. 5. 2001	9. 6., 22. 7. und 24. 9. 2004 1. 6., 1. 8. und 5. 9. 2005 2. 10. 2001	18. 3. 2004	50 kg P ha <sup>-1</sup> , 100 kg K ha <sup>-1</sup>
C	Luzerne „Diana“	30 kg ha <sup>-1</sup> (geimpft)	10. 5. 2001	15. 5., 4. 7. und 10. 9. 2002 10. 6., 23. 7. und 9. 9. 2003 9. 6., 22. 7. und 24. 9. 2004 14. 9. 2005	9. 5. 2001 14. 8. 2001 12. 3. 2002	Saatbereitung Schröpschnitt 20 kg P ha <sup>-1</sup> , 20 kg K ha <sup>-1</sup>
	Hanf „Felina 32“	50 kg ha <sup>-1</sup>	28. 4. 2005		18. 3. 2004. 11. 4. 2005 27. 4. 2005	50 kg P ha <sup>-1</sup> , 100 kg K ha <sup>-1</sup> Luzerneumbruch 50 kg N ha <sup>-1</sup> , Saatbereitung
					25. 5. 2005 22. 6. 2005	30 kg N ha <sup>-1</sup> 70 kg N ha <sup>-1</sup>

<sup>a</sup>Substrattyp (AG Boden 2005): Kipp-Kalklehm sand, Kurzzeichen: oj – cls. <sup>b</sup>Getreidestroh wurde grundsätzlich auf der Fläche belassen und eingearbeitet.



Grundbodenbearbeitung (mitteltiefes Pflügen, 1 × Scheiben, 1 × Eggen) von Hand ausgestreut und mit der Fräse krumentief in den Boden eingearbeitet.

Der Versuch wurde ohne eine echte Wiederholung konzipiert. In jede der neun Versuchspartzen (10 m × 8 m) sind bei Luzerne und Hanf sechs 1 m<sup>2</sup> große Auswertepartzen eingemessen und beerntet worden. Die Ertragsermittlungen erfolgten bei Getreide mit dem Partzenmährescher (6 × 12 m<sup>2</sup> pro Variante) und bei Kartoffeln durch Handrodung von zehn 5 m langen Pflanzreihen („Afra“ 2001) bzw. von 6 × 4 Stauden pro Variante („Adretta“ 2005). Vor der Grundbodenbearbeitung sind pro Partzele je 1 Bodenmischprobe (10 Bohrstockproben/ Mischprobe) aus den Tiefenstufen 0–30 und 30–60 cm entnommen und analysiert worden. Die Beprobung der Ackerkrume erfolgte mehrmals, zuletzt am 26. September 2005 in vierfacher Wiederholung.

Die Bodenkennwerte kennzeichnen den Versuchsstandort als einen Kipp-Kalklehmsand (Tabelle II). Die aus den Analyseergebnissen berechneten C<sub>org</sub>-Gehalte ( $\Delta$ C<sub>t</sub> minus CaCO<sub>3</sub>-C) belegen die Humusfreiheit der Kippsubstrate und begründen die extrem niedrigen N<sub>t</sub>-Gehalte. Die Gehalte an pflanzenverfügbarem P, K und Mg sind ebenfalls sehr niedrig, so dass zu Rekultivierungsbeginn zwecks Anhebung der NPKMg-Bodenvorräte stets über den Pflanzenentzug zu düngen ist. Die im HF-Aufschluss (Flussäure) ermittelten Nährstoffgehalte ergeben nach Altermann et al. (1979) für Ca, Mg und K einen hohen bis sehr hohen und für P einen sehr geringen potentiellen Versorgungsgrad des Versuchsstandortes.

Im Rekultivierungsversuch „HES I-L/2000“ wurden bis 2002 die Einflüsse mengenmäßig variiertes HES-Gaben auf ausgewählte Kennwerte der Bodenfruchtbarkeit und den Ertrag landwirtschaftlicher Kulturen untersucht sowie das in Gefäßversuchen ermittelte MDÄ für Stickstoff aus dem Humusersatzstoff überprüft (Katzur et al. 2003b). In 2003 erfolgte die pflanzenbauliche Nachprüfung der bodenmeliorativen HES-Gaben bei differenzierter N-Mineraldüngung zur Frucht (Tabelle III).

Tabelle II. Bodenkennwerte des landwirtscha (Hichen Rekultivierungsversuches „HES-LAUBAG/2001“<sup>a</sup>).  
(Table II. Soil characteristics of the agricultural recultivation test ‘HES-LAUBAG/2001’<sup>a</sup>.)

Kennwert	Tiefenstufe (cm)			Kennwert	Tiefenstufe (cm)		
	0–30	30–60	$\bar{x}$		0–30	30–60	$\bar{x}$
<i>Textur</i>				<i>HF-Aufschluss</i>			
Skelett (%)	6,2	9,2	7,7	Ca (mg kg <sup>-1</sup> )	15200	13300	14250
Sand (%)	80,0	82,0	81,0	Mg (mg kg <sup>-1</sup> )	1750	1490	1620
Schluff (%)	16,0	13,0	14,5	K (mg kg <sup>-1</sup> )	10500	10000	10250
Ton (%)	4,0	5,0	4,5	P (mg kg <sup>-1</sup> )	150	150	150
pH <sub>H2O</sub>	8,4	8,4	8,4	C <sub>t</sub> (%)	0,53	0,47	0,50
pH <sub>KCL</sub>	7,9	7,9	7,9	N <sub>t</sub> (%)	9 <sup>-03</sup>	9 <sup>-03</sup>	9 <sup>-03</sup>
KAK <sub>pot</sub> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> FB)	6,2	3,2	4,7	C <sub>t</sub> /N <sub>t</sub> -Verh.	58,9	52,2	55,6
BS (% KAK <sub>pot</sub> )	102,3	173,6	138,0	K <sub>(DL)</sub> (mg kg <sup>-1</sup> FB)	32	21	26,5
CaCO <sub>3</sub> (%)	5,4	3,9	4,65	P <sub>(DL)</sub> (mg kg <sup>-1</sup> FB)	23	23	23,0
Bodenart des Feinbodens	Su2	Su2/SI2	Su2	Mg <sub>(PV)</sub> (mg kg <sup>-1</sup> FB)	27	20	23,5
Bodenartengruppe	Lehmsand			N <sub>min</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	0,80	0,74	0,77
				CaCO <sub>3</sub> -C (%)	0,65	0,47	0,56

<sup>a</sup>Substrattyp: Kipp-Kalklehmsand (AG Boden 2005)

Kurzzeichen: oj – cls

Tabelle III. Varianten und Angaben zur Durchführung des landwirtschaftlichen Rekultivierungsversuches „HES I-L/2000“<sup>a</sup>.  
(Table III. Variants and details about the agricultural re-cultivation test HES-I-L/2000<sup>a</sup>.)

Variante	Grundmelioration (19. und 20. September 2000)				Grunddüngung (kg RN ha <sup>-1</sup> )	
	HES-Gabe (79,8% TS; 65,8% C <sub>10</sub> , 5,253% N <sub>t</sub> )		Harnstoffgabe (kg N ha <sup>-1</sup> )	P	K	
	t TM ha <sup>-1</sup>	kg N <sub>t</sub> ha <sup>-1</sup>				
1	–	–	50,0	65	150	
2	1,50	78,8	23,6	65	150	
3	3,75	197,0	59,1	65	150	
4	7,50	394,0	118,2	65	150	
Versuchsdurchführung						
Fruchfolgeglied	Aussaat-			Erntetermin	Bemerkungen	
	Menge	Termin				
Winterroggen „Nikita“	200 kg ha <sup>-1</sup>	26. 9. 2000	25. 7. 2001	18. 9. 2000	Grundbodenbearbeitung (Pflügen 30 cm, 1 × Eggen, 1 × Scheiben) 120 kg N ha <sup>-1</sup>	
Sommerzwischenfrucht (Senf)	19 kg ha <sup>-1</sup>	16. 8. 2001	17. 9. 2001	20. 4. 2001 14. 8. 2001 16. 8. 2001 17. 9. 2001	Stroh gemulcht, Schälfrucht 28 kg N ha <sup>-1</sup> , Saatbettbereitung Senf gemulcht	
Winterroggen „Nikita“	165 kg ha <sup>-1</sup>	9. 10. 2001	19. 7. 2002	19. 9. 2001	HES-Applikation laut Versuchsplan wiederholt 100 kg P ha <sup>-1</sup> , 150 kg K ha <sup>-1</sup> , Saatbettbereitung	
Winterweizen „Ritmo“	172 kg ha <sup>-1</sup>	11. 10. 2002	31. 7. 2003	20. 9. 2001 12. 3. 2002 7. 5. 2002 3. 8. 2002 30. 9. 2002	100 kg N ha <sup>-1</sup> 50 kg N ha <sup>-1</sup> Stroh gemulcht 60 kg N ha <sup>-1</sup> , 50 kg P ha <sup>-1</sup> , 150 kg K ha <sup>-1</sup>	
				10. 10. 2002 26. 3. 2003 27. 3. 2003 14. 4. 2003 11. 6. 2003	Scheiben, Fräsen, Saatbettbereitung 100 kg P ha <sup>-1</sup> , 200 kg K ha <sup>-1</sup> 80 kg N ha <sup>-1</sup> (N2, N3, N4) 20 kg N ha <sup>-1</sup> (N2) 70 kg N ha <sup>-1</sup> (N3, N4) 50 kg N ha <sup>-1</sup> (N4)	

<sup>a</sup>Substrattyp (AG Boden 2005): Flacher Kipp-Reinsand mit Beimengungen von CaCO<sub>3</sub>-führenden Reinsanden und Lehmsanden sowie Lehmsand über Kipp-Lehmsand und Kipp-Reinsand mit Beimengungen CaCO<sub>3</sub>-haltiger Lehmsande und Sandlehme; Kurzzeichen: oj – [((c)ss + ls) + ls]ss \ \ oj – ((c)ls + s)ss + ls.

Die Varianten der Grundmelioration waren auch hier ohne eine echte Wiederholung angelegt worden. In jede der vier 50 m × 50 m großen Teilflächen (Behandlungsvarianten) wurden die N-Mineraldüngungsvarianten (N1 bis N4) in vierfacher Wiederholung mit den Abmessungen 12,5 m × 12,5 m eingeordnet. Der Winterweizen war mit dem Parzellenmähdrescher auf jeweils sechs 1,5 m × 12,5 m großen Auswertparzellen pro Düngungsvariante geerntet worden.

Aus jeder Versuchsparzelle sind vor Versuchsbeginn fünf Bodenmischproben mit dem Bohrstock (10 Einstiche/ Mischprobe) aus den Tiefenstufen 0–30, 30–60, 60–100 und 100–160 cm entnommen und auf die in Tabelle IV ausgewiesenen Kennwerte untersucht worden. Die z.T. sehr hohen Standardabweichungen sind ein Indiz für die starke Heterogenität des Versuchsstandortes und begründen ein breites Bodenartenspektrum der je Tiefenstufe analysierten 20 Mischproben. Die CaCO<sub>3</sub>-Gehalte schwanken je nach dem Mischungsanteil von Geschiebemergel sowie karbonathaltigen Schmelzwassersanden und Schluffen am Kippsubstrat zwischen 0 und 6,4 Masse-%. Wesentlich für die Versuchsdurchführung sind die sehr niedrigen C<sub>org</sub>-, N<sub>t</sub>- und N<sub>min</sub>-Gehalte im Oberboden.

Im Versuch „**HES II-L/2003**“ wurde der Humusersatzstoff in Kombination mit einer Gründüngung angewendet und mit Winter-Triticale pflanzenbaulich nachgeprüft (Tabelle V).

Die Grundbodenbearbeitung war hier wegen stellenweise starker Bodenverdichtungen ( $d_B \geq 1,67$  bis  $1,74 \text{ g ccm}^{-1}$ ) durch 60 cm tiefes Meißeln ergänzt worden. Der Humusersatzstoff wurde wie die NPK-Mineraldüngemittel mit dem Düngerstreuer ausgebracht und mit der Bodenfräse ca. 15 cm tief in den Boden eingearbeitet. Die N-Mineraldüngung zu Winter-Triticale erfolgte nach 4 Varianten, die in vierfacher Wiederholung in jede der 50 m × 50 m großen Teilflächen der Grundmelioration randomisiert eingeordnet wurden. Die Parzellen (12,5 m × 12,5 m) der Düngungsvariante N1 erhielten keinen Stickstoff, während bei N2 bis N4 die erste N-Gabe zu Versuchsbeginn und die zweite zum Zeitpunkt des Schossens von Hand ausgebracht wurde. Bei N4 wurde kurz vor der Getreideblüte noch eine dritte N-Gabe appliziert. Die Getreideernte erfolgte mit dem Parzellenmähdrescher auf drei 16,25 m<sup>2</sup> großen Teilflächen pro Düngungsparzelle.

Dieser Versuchsstandort ist vor allem durch die höheren Schluff- und CaCO<sub>3</sub>-Gehalte von der benachbarten Versuchsfläche HES I-L/2000 unterschieden und weist wie diese sehr niedrige N<sub>t</sub>- und N<sub>min</sub>-Bodenvorräte auf (vgl. Tabelle IV).

Im polyfaktoriellen Versuch „**HES-NSG/Burg 2003**“ wurde der Einfluss steigender HES-Gaben auf den Ertrag von Tomate und Gurke im Gewächshaus geprüft und mit dem von Stallmist (300 dt ha<sup>-1</sup>) bei differenzierter N-Mineraldüngung zur Frucht verglichen (Tabelle VI). Zu diesem Zweck hatten wir den humosen Oberboden auf 450 m<sup>2</sup> Gewächshausfläche abgetragen und durch eine 30 cm mächtige Schicht aus Kipp-Kiesreinsand ersetzt.

Die fünf Meliorationsvarianten waren ohne eine echte Wiederholung angelegt worden. Die vier N-Düngungsvarianten (A, B, C und D) wurden in vierfacher Wiederholung als Lateinisches Rechteck in die Teilstücke der Grundmelioration (9,6 m × 8,8 m) eingeordnet. Daraus ergeben sich insgesamt 80 Versuchsparzellen mit den Abmessungen von jeweils 2,4 m × 2,2 m. Die NPK-Düngung zur Tomate erfolgte teils mit Flüssigdünger (Kristalon), teils mit Feststoffdünger. Bei der nachgebauten Gurke wurde die N-Düngung ausschließlich mit Kristalon (15 N, 5 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 30 K<sub>2</sub>O, 3 MgO) und Harnstoff-Flüssigdünger durchgeführt. Kristalon war bei allen Düngungsvarianten vier Monate lang (11. Mai bis 24. August 2004) in wöchentlichen Einzelgaben von 11,25 kg N ha<sup>-1</sup> (16 Einzelgaben × 11,25 kg N ha<sup>-1</sup> = 180 kg N ha<sup>-1</sup>) ausgebracht worden. Die zu den Zielvorgaben der Düngungsstufen B, C und D noch fehlenden N-Mengen wurden als Harnstoff-Flüssigdüngung mit der Gießkanne

Tabelle IV. Bodenkennwerte und ihre Standardabweichungen ( $\bar{x} \pm \text{dn} - 1$ ) auf den Versuchsfächen HES I-L/2000 und HES II-L/2004 vor dem Versuchsbeginn.  
(Table IV. Soil characteristics and standard deviation ( $\bar{x} \pm \text{dn} - 1$ ) of the investigation plots HES I-L/2000 and HES II-L/2004 before the start of the tests.)

Tiefenstufe Kennwert	HES I-L/2000					HES II-L/2003				
	0–30 cm	30–60 cm	60–100 cm	100–160 cm	100–160 cm	0–30 cm	30–60 cm	60–100 cm	100–160 cm	100–160 cm
Körmung (Masse-%)										
Sand	87,8 ± 5,2	83,0 ± 10,9	78,7 ± 15,9	80,5 ± 10,0	80,5 ± 10,0	74,2 ± 22,2	68,4 ± 30,2	66,4 ± 30,0	61,1 ± 33,7	61,1 ± 33,7
Schluff	8,9 ± 3,2	11,2 ± 6,6	13,6 ± 8,3	13,2 ± 6,6	13,2 ± 6,6	18,9 ± 18,3	24,5 ± 25,1	25,7 ± 24,9	30,0 ± 28,0	30,0 ± 28,0
Ton	3,3 ± 2,5	5,8 ± 5,1	7,7 ± 8,6	6,3 ± 4,3	6,3 ± 4,3	6,0 ± 4,1	7,2 ± 5,4	7,9 ± 5,3	8,9 ± 5,8	8,9 ± 5,8
Bodenart (AG)	Ss(mSfs + mSgs)	SI2	SI2	SI2	SI2	SI2	SI2	Su3	SI3	SI3
Boden 2005)										
pH <sub>H2O</sub>	7,78 ± 0,57	7,18 ± 0,99	6,94 ± 1,13	7,0 ± 1,01	7,0 ± 1,01	7,74 ± 0,66	7,39 ± 1,01	7,33 ± 0,95	7,49 ± 0,77	7,49 ± 0,77
pH <sub>KCl</sub>	7,42 ± 0,55	6,54 ± 1,24	6,32 ± 1,36	6,4 ± 1,25	6,4 ± 1,25	7,40 ± 0,78	7,0 ± 1,16	6,85 ± 1,13	7,23 ± 0,95	7,23 ± 0,95
C <sub>t</sub> (%)	0,116 ± 0,125	0,232 ± 0,338	0,292 ± 0,385	0,280 ± 0,341	0,280 ± 0,341	0,514 ± 0,751	0,612 ± 0,975	0,664 ± 0,975	0,87 ± 1,142	0,87 ± 1,142
C <sub>org</sub> (%)	0,046 ± 0,081	0,102 ± 0,181	0,133 ± 0,200	0,102 ± 0,151	0,102 ± 0,151	0,184 ± 0,303	0,202 ± 0,353	0,228 ± 0,384	0,314 ± 0,48	0,314 ± 0,48
N <sub>t</sub> (%)	9 <sup>-03</sup> ± 2,4 <sup>-03</sup>	10,7 <sup>-03</sup> ± 5,2 <sup>-03</sup>	12,1 <sup>-03</sup> ± 5,7 <sup>-03</sup>	10,9 <sup>-03</sup> ± 5,1 <sup>-03</sup>	10,9 <sup>-03</sup> ± 5,1 <sup>-03</sup>	12,0 <sup>-03</sup> ± 8,6 <sup>-03</sup>	12,8 <sup>-03</sup> ± 11,2 <sup>-03</sup>	13,7 <sup>-03</sup> ± 11,2 <sup>-03</sup>	15,9 <sup>-03</sup> ± 13,8 <sup>-03</sup>	15,9 <sup>-03</sup> ± 13,8 <sup>-03</sup>
C <sub>org</sub> /N <sub>t</sub>	5,1	9,5	11,0	12,7	12,7	15,3	15,8	16,6	19,7	19,7
Verhältnis										
CaCO <sub>3</sub> (%)	0,32 ± 0,57	0,78 ± 1,57	1,09 ± 1,84	1,19 ± 1,81	1,19 ± 1,81	2,37 ± 4,06	3,14 ± 5,43	3,25 ± 5,26	4,20 ± 5,96	4,20 ± 5,96
N <sub>min</sub> (mg kg <sup>-1</sup> TS)	0,87 ± 0,23	0,97 ± 0,25	0,97 ± 0,46	0,81 ± 0,22	0,81 ± 0,22	0,71 ± 0,08	0,69 ± 0,11	n.b. <sup>a</sup>	n.b. <sup>a</sup>	n.b. <sup>a</sup>

<sup>a</sup>n.b., nicht bestimmt.

Tabelle V. Landwirtschaftlicher Rekultivierungsversuch „HES II-L/2003“<sup>a</sup>  
(Table V. Agricultural re-cultivation test 'HES II-L/2003'<sup>a</sup>.)

Variante	Grundmelioration (03. Juni 2003)						
	HES-Gabe (72,1% TS; 5,78% N <sub>t</sub> )		Harnstoffgabe (kg N ha <sup>-1</sup> )		Grunddüngung (kg RN ha <sup>-1</sup> )		
	t TM ha <sup>-1</sup>	kg N <sub>t</sub> ha <sup>-1</sup>	kg N <sub>MDA</sub> ha <sup>-1</sup>		P	K	
1	–	–	–	100,0	160	250	
2	3,0	173,4	52,0	48,0	160	250	
3	7,5	433,5	130,0	–	160	250	
4	15,0	867,0	260,0	–	160	250	
			Versuchsdurchführung				
Aussaat-							
Fruchtfolgeglied	Menge	Termin	Erntetermin	Bemerkungen			
Senf „Zlata“	22 kg ha <sup>-1</sup>	6. 6. 2003	11. 8. 2003 (Grün-düngung)	22. 5. 2003	Grundbodenbearbeitung (Meißeln 60 cm, Pflügen 30 cm, 1 × Scheiben)		
Winter-Triticale „Kitaro“	144 kg ha <sup>-1</sup>			3. 6. 2003	Saatbearbeitung		
				11. 8. 2003	Senf gemulcht		
			17. 9. 2003	29/30. 7. 2004	11. 9. 2003	100 kg P ha <sup>-1</sup> , 120 kg K ha <sup>-1</sup>	
					16. 9. 2003	Schälfruche und Saatbearbeitung (N2, N3, N4)	
					18. 3. 2004	80 kg N ha <sup>-1</sup> (N2)	
				12. 5. 2004	20 kg N ha <sup>-1</sup> (N3, N4)		
				3. 6. 2004	70 kg N ha <sup>-1</sup> (N4)		

<sup>a</sup>Substratyp (AG Boden 2005): Kipp-Reinsand und Kipp-Lehmsand mit Beimengungen von CaCO<sub>3</sub>-haltigem Lehmsand, Lehmschluff und Tonschluff; Kennzeichen: o) – ss + ls((c)ls, lu, tu).

Tabelle VI. Gewächshausversuch „HES-NSG/Burg 2003“ mit Kipp-Kiesreinsand (oj – kss).  
(Table VI. Greenhouse test 'HES-NSG/Burg 2003' on dump gravel sand (oj – kss).)

Grundmelioration (17. und 20. März 2003)									
Variante	Organische Düngung				Mineraldüngung (kg RN ha <sup>-1</sup> )				
	Org. Dünger (dt ha <sup>-1</sup> )	N <sub>t</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	N <sub>MDA</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )		Ca	P	K		
1	300 Sm <sup>a</sup> FM	180	54		643	220	180		
2	37,5 HES lutro <sup>b</sup>	156	47		643	220	180		
3	75 HES lutro	312	94		643	220	180		
4	150 HES lutro	625	188		643	220	180		
5	300 HES lutro	1250	375		643	220	180		
Versuchsdurchführung									
Fruchtfolge	Saat-/Pflanztermin	Pflanzen/Parzelle	Erntebeginn/-abschluss	Bemerkungen					
Tomate „Sportivo“	30. 4. 2003	12 Stück/5,28 m <sup>2</sup> (73 cm × 60 cm)	23. 6.–7. 10. 2003 (108 Erntetage)	17./ 20. 3. 2003 20. 5. + 6. 6. 2003	Pflanzbetbereitung Tröpfchenbewässerung nach Bedarf Flüssigdüngung mit Kristalon (48 kg N, 80 kg K, 7 kg und 6 kg Mg pro ha)				
Variante					N-Mineraldüngung (kg ha <sup>-1</sup> )				
					8. 5. 2003	10. 6. 2003	25. 6. 2003	Summe	
A					12	–	30	42	
B					24	–	84	108	
C					36	24	126	186	
D					48	48	168	264	

(continued)

Tabelle VI. (Continued).

Fruchtfolge	Versuchsdurchführung				Bemerkungen
	Saat-/Pflanztermin	Pflanzen/Parzelle	Erntebeginn/-abschluss	Erntedatum	
Gurke „Saladin“	27. 4. 2004	15 Stück/ 5,28 m <sup>2</sup> (50 cm × 70 cm)	3. 6.–21. 10. 2004 (141 Erntetage)	15. 4. 2004	75 kg P ha <sup>-1</sup> , 165 kg K ha <sup>-1</sup> und Pflanzzeitbereitung Tröpfchenbewässerung nach Bedarf alle 7 Tage NPKMg-Flüssigdüngung (16 Einzelgaben)
				11.05.–24.09.04	N-Mineraldüngung (kg RN ha <sup>-1</sup> )
				Variante	Kristallon
				A	180
				B	180
				C	360
				D	540
				Summe	180
					–
					180
					360
					540
					720

<sup>a</sup>Stm, Stallmist (Rottemist) (Frischmasse). <sup>b</sup>HES, Humusersatzstoff (chemisch veränderte Weichbraunkohle), lufttrocken.

in ebenfalls 16 Einzelgaben appliziert. Vor der Pflanzung waren die für eine optimale Nährstoffversorgung aus den aktuellen Bodenvorräten und dem prognostizierten Nährstoffzug durch die Pflanzen berechneten PK-Düngergaben ausgestreut und flach in den Boden eingearbeitet worden. Der Mehrnährstoff-Flüssigdünger wurde mittels Dosiervorrichtung zusammen mit dem Beregnungswasser (Tröpfchenbewässerung) ausgebracht.

Die Bodenproben wurden nach den standardisierten Analyseverfahren auf folgende Kennwerte untersucht: Textur (%; DIN 19683-2); Glühverlust (%; DIN 19684-3); pH-Wert (DIN ISO 10390); Kationenaustauschkapazität ( $KAK_{pot}$ ) ( $cmol_c\ kg^{-1}$  FB; FIB\_AV 06, ehemals DIN 19684-8);  $C_t$  (%; DIN ISO 10694);  $N_t$  (%; DIN ISO 13878); HF-MW Druckaufschluss (EPA 3052); Ca, K, P, Mg ( $mg\ kg^{-1}$  FB; DIN ISO 11885);  $CaCO_3$  (%; DIN ISO 10693); Doppellaktatverfahren  $K_{(DL)}$ ,  $P_{(DL)}$  ( $mg\ kg^{-1}$  FB; LUFA Bd. 1 A 6.2.1.2), Auszug  $Mg_{(CaCl_2)}$  ( $mg\ kg^{-1}$  FB; LUFA Bd. 1 A 6.2.4.1); Fe, Zn, Cu, Mn, B, Mo ( $mg\ kg^{-1}$  FB; DIN ISO 11885-E 22);  $N_{min}$  ( $mg\ kg^{-1}$  FB; Berechnung aus  $NH_4^+$ -N und  $NO_3^-$ -N);  $C_{org}$  (%; rechnerisch aus  $C_t$  minus  $CaCO_3$ -C);  $NH_4$ -N,  $NO_3$ -N ( $mg\ kg^{-1}$  FB; LUFA Bd. 1 A 6.1.4.1); und austauschbare Basen ( $cmol_c\ kg^{-1}$  FB; DIN 38406 E 28).

An ausgewählten Ernteproben (Haupt- und Nebenprodukte) waren die Trockensubstanzgehalte (LUFA Bd. III 2.1.1–2.2.2) bestimmt worden. Die Versuchsergebnisse wurden varianzanalytisch ausgewertet (Weber 1976).

## Ergebnisse und Diskussion

### *Bodenfruchtbarkeitsmerkmale*

Die 52 Monate nach der Grundmelioration in der Ackerkrume des Versuches „**HES-LAUBAG/2001**“ erhobenen Bodenkennwerte (Tabelle VII) bestätigen, dass bei allen Fruchtfolgen mit der Höhe der HES-Gabe die  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte sowie die potentiellen Kationenaustauschkapazitäten ( $KAK_{pot}$ ) überwiegend signifikant anstiegen. Die in der Rekultivierungsperiode bei den Kipp-Lehmsanden anzustrebenden Mindestgehalte an organischer Substanz (Humus) von 0,64 bis 0,93%  $C_{org}$  werden in der Fruchtfolge B (60% Luzerne, 20% Hackfrucht, 20% Getreide) nach Luzerne und Fruchtfolge C (80% Luzerne, 20% Hanf) nach Hanf bei HES-Gaben von 150 und 300 dt TM  $ha^{-1}$  mit 0,77 und 1,03%  $C_{org}$  (B) bzw. von 75 und 150 dt TM  $ha^{-1}$  mit 0,66 und 0,73%  $C_{org}$  (C) erreicht. Die vergleichsweise stets niedrigeren  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte weisen trotz Gründüngung und wiederholter Strohdüngung die Meliorationsvarianten der Fruchtfolge A auf, was in dem hohen Anteil humuszehrender Hauptfrüchte an der Fruchtfolge begründet ist. Für Fruchtfolgen mit einem Anbauverhältnis von 34% einjährigem Feldfutter und 66% Luzerne-Grasgemenge hat Gunschera (1978) eine mittlere jährliche Humusakkumulationsrate von 0,025 bis 0,035%  $C_{org}$  im Ap-Horizont nachgewiesen, während nach Schröder et al. (1987) der Humusspiegel in rekultivierten Kippenböden nur um jährlich 0,017 bis 0,023 Masse-%  $C_{org}$  angehoben werden kann. Hiernach wären im Mittel 30 bis 50 Bewirtschaftungsjahre nötig, um das  $C_{org}$ -Sättigungsniveau von 1 Masse-% in der Ackerkrume zu erreichen.

Die Mittelwertvergleiche zwischen den Fruchtfolgen belegen die signifikant positiven Einflüsse des Luzerneanbaus bei Fruchtfolge C und bei Fruchtfolge B in Kombination mit einer durchschnittlichen höheren HES-Gabe auf die Austauschkapazitäten sowie  $C_{org}$ - und  $N_t$ -Gehalte. Die  $C_{org}/N_t$ -Verhältnisse werden mit steigenden HES-Gaben weiter und zeigen eine von der Fruchtfolge abhängige Differenziertheit. Die z.T. deutlich weiteren  $C_{org}/N_t$ -Verhältnisse der HES-gedüngten Parzellen resultieren zum einen aus dem höheren N-Entzug über den Pflanzenertrag (Feldabfuhr) und werden im weiteren darauf zurückgeführt, dass nach Freisetzung und pflanzlicher Verwertung der leichter mobilisierbaren N-Vorräte aus



Tabelle VII. Mittelwertvergleiche ausgewählter Bodenparameter der Ackerkrume (0–20 cm) vom 26. September 2005 zwischen den Meliorationsvarianten ( $n=4$ ) und Fruchtfolgen ( $n=12$ ) des landwirtschaftlichen Rekultivierungsversuches „HES-LAUBAG/2001“.

(Table VII. Mean value comparisons of chosen soil characteristics of the tith (0–20 cm) between the amelioration variants ( $n=4$ ) and crop rotations ( $n=12$ ) of the agricultural re-cultivation test ‘HES-LAUBAG/2001’ taken on 26 September 2005).

Fruchtfolge	HES-Gabe (t TM ha <sup>-1</sup> )	GV (%)	C <sub>org</sub> (%)	N <sub>i</sub> (‰)	C <sub>org</sub> /N <sub>t</sub> Verh.	KAK <sub>pot</sub> (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> FB)	Austauschbare Basen (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> FB)						pH <sub>KCl</sub>			
							Summe	davon			Sättigungsverhält- nisse (%)					
								Ca	Mg	K	Ca	Mg		K		
A	0	1,04	0,33	0,25	13,0	2,66	3,42	2,98	0,21	0,21	0,21	87,2	6,1	6,2	8,1	7,7
	7,5	1,14	0,46	<b>0,29</b>	16,0	2,92	3,81	3,34	0,24	0,22	0,22	87,6	6,4	5,8	8,1	7,7
	15,0	<b>1,53</b>	<b>0,60</b>	<b>0,35</b>	17,1	<b>3,72</b>	<b>5,23</b>	<b>4,54</b>	<b>0,35</b>	<b>0,33</b>	<b>0,33</b>	86,8	6,6	6,2	8,1	7,7
	$\bar{x}$	1,24	0,46	0,30	15,4	3,08	4,15	3,62	0,27	0,25	0,25	87,2	6,4	6,1	8,1	7,7
	GD 5%	0,276	0,159	0,027	4,80	0,657	0,921	0,806	0,068	0,097	0,097	2,43	1,12	1,64	n.b.	n.b.
B	0	1,24	0,47	0,28	16,8	3,60	4,25	3,86	0,21	0,18	0,18	90,7	4,9	4,3	8,3	7,7
	15	<b>2,00</b>	<b>0,77</b>	<b>0,42</b>	18,4	<b>4,42</b>	<b>5,58</b>	<b>5,11</b>	<b>0,30</b>	0,17	0,17	91,6	5,4	3,1	8,1	7,6
	30	<b>2,24</b>	<b>1,03</b>	<b>0,50</b>	<b>20,5</b>	<b>5,35</b>	<b>7,05</b>	<b>6,45</b>	<b>0,43</b>	0,17	0,17	91,5	<b>6,1</b>	<b>2,4</b>	8,1	7,6
	$\bar{x}$	1,83	0,76	0,40	18,6	4,46	5,63	5,14	0,31	0,17	0,17	91,2	5,5	3,3	8,2	7,6
	GD 5%	0,656	0,105	0,067	1,9	0,505	0,663	0,678	0,048	0,054	0,054	1,83	0,78	1,26	n.b.	n.b.
C	0	1,89	0,44	0,27	16,5	3,48	5,27	4,93	0,21	0,12	0,12	93,7	3,9	2,4	8,2	7,7
	7,5	1,38	0,66	0,35	18,6	4,40	6,62	6,16	0,30	0,16	0,16	93,2	3,4	2,4	8,2	7,7
	15,0	1,80	<b>0,73</b>	<b>0,39</b>	18,9	3,40	5,12	4,79	0,22	0,11	0,11	93,8	4,2	2,0	8,2	7,7
	$\bar{x}$	1,69	0,61	0,34	18,0	3,76	5,67	5,29	0,24	0,13	0,13	93,6	3,84	2,3	8,2	7,7
	GD 5%	0,806	0,247	0,092	3,62	1,404	1,979	1,802	0,130	0,053	0,053	1,06	1,94	0,66	n.b.	n.b.
$\bar{A}$	(7,5)	1,24	0,46	0,30	15,4	3,08	4,15	3,62	0,27	0,25	0,25	87,2	6,4	6,1	8,1	7,7
$\bar{C}$	(7,5)	<b>1,69</b>	<b>0,61</b>	0,34	<b>18,0</b>	<b>3,76</b>	<b>5,67</b>	<b>5,29</b>	0,24	<b>0,13</b>	<b>0,13</b>	<b>93,6</b>	<b>3,8</b>	<b>2,3</b>	8,2	7,7
$\bar{B}$	(15,0)	<b>1,83</b>	<b>0,76</b>	<b>0,40</b>	<b>18,6</b>	<b>4,46</b>	<b>5,63</b>	<b>5,14</b>	0,31	<b>0,17</b>	<b>0,17</b>	<b>91,2</b>	<b>5,5</b>	<b>3,3</b>	8,2	7,6
$\bar{x}$	1,59	0,61	0,34	17,3	3,77	5,15	4,68	0,27	0,19	0,19	90,7	5,2	3,9	8,2	7,7	
GD 5%	0,393	0,164	0,064	2,13	0,656	0,986	0,897	0,071	0,084	0,084	0,92	0,72	0,72	n.b.	n.b.	
Mittel	0	1,39	0,41	0,27	15,4	3,25	4,31	3,92	0,21	0,17	0,17	90,5	5,0	4,3	8,2	7,7
	7,5	1,26	0,56	0,32	17,3	3,66	5,22	4,75	0,27	0,19	0,19	90,4	4,9	4,1	8,2	7,7
	15,0	1,78	0,70	0,39	18,1	3,85	5,31	4,81	0,29	0,20	0,20	90,7	5,4	3,8	8,1	7,7
	30,0	2,24	1,03	0,50	20,5	5,35	7,05	6,45	0,43	0,17	0,17	91,5	6,1	2,4	8,1	7,6

n.b., nicht bestimmt.

dem Humusdünger die Relationen zwischen den  $C_{\text{org}}$ - und  $N_t$ -Gehalten zugunsten der  $C_{\text{org}}$ -Werte (wegen der höheren Abbauresistenz der N-modifizierten Kohle-Huminstoffe) verändert werden.

Durch die Humusdüngung werden vor allem die Bodenvorräte an austauschbar gebundenen  $\text{Ca}^{2+}$ - und  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen z.T. signifikant erhöht (Tabelle VII). Der Einfluss auf die  $\text{Ca}^{2+}$ -,  $\text{Mg}^{2+}$ - und  $\text{K}^+$ -Sättigung ist überwiegend gering, wie ein Vergleich zwischen den Meliorationsvarianten der Fruchtfolgen zeigt. Bemerkenswert ist, dass im Versuchsmittel bei den grobfutterbetonten Fruchtfolgen B (60% Luzerne) und C (80% Luzerne) die statistisch gesichert höheren  $\text{Ca}^{2+}$ - sowie deutlich niedrigeren  $\text{Mg}^{2+}$ - und  $\text{K}^+$ -Sättigungen ermittelt werden als bei der getreidebetonten Fruchtfolge A (75% Getreide) mit Kartoffel als letztes Fruchtfolgeglied. Offensichtlich führt die Bewirtschaftung bei Fruchtfolge A zu einer signifikant stärkeren Freisetzung von  $\text{K}^+$ - und  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen aus dem Bodenspool.

Der Stickstoff liegt überwiegend organisch gebunden vor, so dass vor allem die Auswirkungen der HES-Applikation auf die N-Mineralisierungsrate, also die Relation von  $N_{\text{min}}$  zu  $N_t$  interessieren. Derartige Betrachtungen können jedoch nur für die jeweilige Fruchtfolge angestellt werden, denn Bodenbearbeitung, Düngung und Pflanzenanbau beeinflussen signifikant die  $N_{\text{min}}$ -Bodenvorräte (Tabelle VIII). Bei der Fruchtfolge A sind zum Zeitpunkt der Bodenprobennahme die  $N_{\text{min}}$ -Gehalte aufgrund des fehlenden N-Entzuges durch Pflanzen und die N-Düngung vom 22. September 2005 ( $50 \text{ kg N ha}^{-1} \hat{=} 17,1 \text{ mg N kg}^{-1} \text{ TS}$ ) am höchsten. Jedoch sind die  $N_{\text{min}}$ -Gehalte und N-Mineralisierungsraten bei den HES-gedüngten Parzellen niedriger als bei der Vergleichsvariante ohne HES. Durch die HES-Anwendung werden nicht nur die  $N_t$ -Bodenvorräte erhöht, sondern auch der Anteil der mikrobiell schwer abbaubaren Huminstoffe (Dauerhumus) am  $C_{\text{org}}$  und damit der schwer mineralisierbaren N-Verbindungen am  $N_t$ . Dies führt im Versuch zu einer etwas geringeren Netto-N-Mineralisation. Ähnliches gilt für die Meliorationsvarianten der Fruchtfolge B und C, wobei unter dem Luzerneaufwuchs der Fruchtfolge B die niedrigsten  $N_{\text{min}}$ -Gehalte bestimmt werden.

Die pflanzenverfügbaren  $P_{(\text{DL})}$ -Bodenvorräte liegen bei den Fruchtfolgen A und B aufgrund der höheren P-Mineraldüngergaben von 560 (A) bzw. 360  $\text{kg P ha}^{-1}$  (B) z.T. deutlich über der Sollwertspanne von 5,6 bis 8,0  $\text{mg P}_{(\text{DL})} 100 \text{ g}^{-1}$  Boden. Deshalb ist ab sofort keine ( $\geq 12,1 \text{ mg P}_{(\text{DL})} 100 \text{ g}^{-1}$  Boden) oder nur noch eine reduzierte P-Düngung ( $\geq 8,1 \text{ mg P}_{(\text{DL})}/100 \text{ g}^{-1}$  Boden) notwendig (Autorenkollektiv 2000). Anders ist es bei der Fruchtfolge C mit einer Mineraldüngergabe von insgesamt nur 180  $\text{kg P ha}^{-1}$ . Hier sind die  $P_{(\text{DL})}$ -Gehalte sehr niedrig bis niedrig ( $\leq 3,1$  bzw.  $\leq 5,5 \text{ mg P}_{(\text{DL})} 100 \text{ g}^{-1}$  Boden) und erfordern so einen Zuschlag zur P-Düngung nach Entzug zwecks Anhebung der  $P_{(\text{DL})}$ -Bodenvorräte.

Bei allen Fruchtfolgen ist ein gewisser Einfluss der HES-Düngung auf die Gehalte an pflanzenverfügbarem P, K und Mg erkennbar. Das Adsorptionsvermögen der Huminstoffe für austauschbar gebundene  $\text{Mg}^{2+}$ -Ionen ist zwar geringer als für  $\text{Ca}^{2+}$ , bedingt aber dennoch, dass die pflanzenverfügbaren  $\text{Mg}_{(\text{PV})}$ -Gehalte in den HES-gedüngten Böden stets höher sind als bei der Vergleichsvariante und i.d.R. mit der Höhe der HES-Gabe steigen. Im Unterschied dazu werden die  $\text{K}^+$ -Ionen nur sehr schwach an der organischen Substanz gebunden, so dass dieser Anteil an den pflanzenverfügbaren K-Bodenvorräten nur kurzfristig nach einer K-Mineraldüngung mit steigender HES-Gabe erhöht wird (Fruchtfolge A). Bald danach werden die  $\text{K}^+$ -Ionen wieder stärker von den Austauscherplätzen verdrängt, in die Bodenlösung überführt und durch Auswaschung oder Pflanzenentzug aus der rhizosphären Bodenschicht entfernt (Fruchtfolge B). Also ist der Einfluss der Humusdüngung auf die Pflanzenverfügbarkeit von Kalium nur von kurzer Dauer. Wesentlich bedeutsamer sind die K-fixierenden Eigenschaften der Kippenböden und die K-Mineraldüngungen, wie ein

Tabelle VIII. Pflanzenverfügbare Nährstoffgehalte der Ackerkrume (0–20 cm) des Rekultivierungsversuches „HES-LAUBAG/2001“ vom 26. September 2005 ( $n=4$ ).  
(Table VIII. Plant available nutrient contents of the tith (0–20 cm) of the recultivation test ‘HES-LAUBAG/2001’ ( $n=4$ ) from 26 September 2005.)

Fruchtfolge	HES-Gabe (t TM ha <sup>-1</sup> )	N <sub>min</sub> (mg kg <sup>-1</sup> TS)	davon		K <sub>(DL)</sub>	P <sub>(DL)</sub>	Mg <sub>(CaCl2)</sub>	N-Mineralisierungsrate (N <sub>min</sub> % von N <sub>t</sub> )
			(in % von N <sub>min</sub> )					
			NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>3</sub> -N				
A	0	33,1	32,4	67,6	7,3	8,6	2,3	13,46
	7,5	28,2	27,9	72,1	8,7	10,5	2,7	9,90
	15,0	25,5	23,7	76,3	10,0	11,0	3,2	7,22
	$\bar{x}$	28,9	28,0	72,0	8,7	10,0	2,7	10,19
	GD 5%	18,43	12,73	12,73	2,98	2,48	0,57	7,103
B	0	1,9	0	100,0	6,8	14,7	2,4	0,66
	15	1,1	0,6	99,4	6,4	15,8	3,0	0,27
	30	1,0	1,5	98,5	5,7	13,8	4,3	0,21
	$\bar{x}$	1,3	0,7	99,3	6,3	14,8	3,2	0,38
	GD 5%	1,26	1,40	1,47	1,51	3,73	0,65	0,376
C	0	6,6	9,2	90,8	5,5	2,7	2,3	2,43
	7,5	7,9	5,8	94,2	7,4	3,0	3,3	2,28
	15,0	7,6	7,9	92,1	6,9	3,3	2,8	1,97
	$\bar{x}$	7,4	7,6	92,4	6,6	3,0	2,8	2,23
	GD 5%	2,30	3,28	4,39	1,50	0,66	1,09	0,546
$\bar{A}$	(7,5)	28,9	28,0	72,0	8,7	10,0	2,7	10,19
$\bar{C}$	(7,5)	7,4	7,6	92,4	6,6	3,0	2,8	2,23
$\bar{B}$	(15,0)	1,3	0,7	99,3	6,3	14,8	3,2	0,38
	$\bar{x}$	12,5	12,1	87,9	7,2	9,3	2,9	4,27
	GD 5%	5,38	4,07	8,13	1,22	1,40	0,62	2,32
Mittel	0	13,9	13,9	86,1	6,5	8,7	2,3	5,52
	7,5	18,1	16,8	83,2	8,1	6,8	3,0	6,09
	15,0	11,4	10,7	89,3	7,8	10,0	3,0	3,15
	30,0	1,0	1,5	98,5	5,7	13,8	4,3	0,21

Vergleich zwischen den Fruchtfolgen zeigt. Beispielsweise wurden bei der Fruchtfolge A insgesamt  $610 \text{ kg K ha}^{-1}$  und am 22. September 2005 noch zusätzlich  $50 \text{ kg K ha}^{-1}$  appliziert. Hier hat die kurz vor der Probenentnahme durchgeführte Düngungsmaßnahme zu den gegenüber den anderen Fruchtfolgen signifikant höheren  $K_{(DL)}$ -Gehalten geführt (vgl. Tabelle VIII). Bei den Fruchtfolgen B und C wurde die letzte K-Gabe ( $100 \text{ kg ha}^{-1}$ ) bereits am 18. März 2004 ausgebracht und hatten die stark differierenden K-Gesamtgaben von  $560$  (B) bzw.  $280 \text{ kg K ha}^{-1}$  (C) infolge Pflanzenentzug, Auswaschung und K-Fixierung keinen bedeutenden Einfluss auf die pflanzenverfügbaren K-Bodenvorräte.

In Tabelle IX sind die bodenkundlichen Ergebnisse des mit gärtnerischen Kulturen im Gewächshaus durchgeführten HES-Steigerungsversuches HES-NSG/Burg 2003 zusammengestellt. Sie bestätigen die Ergebnisse des Freilandversuches und zeigen, dass mit der Höhe der HES-Gabe (Varianten 2 bis 5) die  $C_r$ -,  $N_r$ -,  $K_{(DL)}$ -,  $P_{(DL)}$ -, und  $Mg_{(PV)}$ -Gehalte der kolloidarmen Kipp-Kiesreinsande (1 Masse-% Schluff und Ton) steigen, während die pH-Werte sinken und die C/N-Verhältnisse zunehmend weiter werden. Auffällig ist, dass die an der Höhe der HES-Gabe gebundenen Anstiege der pflanzenverfügbaren Nährstoffvorräte bei Kalium wesentlich geringer ausfallen als bei Magnesium.

Da die chemisch veränderten Weichbraunkohlen neben den Huminstoffen noch ca. 0,80% Fe und 0,19% Al enthalten (Katzur et al. 2002b), wirken sie sich vermutlich in verschiedener Weise auf die Löslichkeit des Bodenphosphats aus. Zum einen werden bei höheren HES-Gaben die pH-Werte abgesenkt und dadurch die Löslichkeit der Calciumphosphate  $[P(Ca)]$  sowie der Anteil des spezifisch adsorbierten Phosphats am Bodenphosphat  $[P(Al, Fe)]$  erhöht. Als Adsorbentien fungieren unter anderem  $Fe^{3+}$ -/ $Al^{3+}$ -Hydroxide und -Oxide und organische Stoffe, wenn sie komplex gebundenes  $Fe^{3+}$  oder  $Al^{3+}$  enthalten. Zum anderen könnte in den HES-behandelten Böden auch eine Phosphat-Desorption durch organische Anionen (der Fulvosäuren und Huminsäuren) stattfinden. Letztere blockieren in adsorbiertem Zustand die Adsorption der Phosphationen, was ebenfalls zu einer vorübergehend höheren P-Konzentration in der Bodenlösung führen kann. Zudem dürfte in der Bodenlösung ein erheblicher P-Anteil in organischer Bindung vorliegen. Die organischen P-Verbindungen werden wahrscheinlich erst nach Abbau durch Enzyme, vor allem durch die Phytase pflanzenverfügbar. Sie kommt in Mikroorganismen vor und wird auch durch die Pflanzenwurzeln freigesetzt (Scheffer & Schachtschabel 1992). Ebenso ließen sich die mit der HES-Gabe geringfügig steigenden  $P_{(DL)}$ -Gehalte (vgl. Tabelle IX) unter Umständen auch auf die jeweils höheren alkalischen Phosphatase-Aktivitäten (Katzur et al. 2002c) zurückführen.

Die im EDTA-Auszug nachgewiesenen potentiell pflanzenverfügbaren Schwermetallgehalte betreffen die organisch gebundenen Fraktionen. Sie zeigen für Fe und Zn eine Tendenz zu höherer Mobilität bei steigenden HES-Gaben, während für Cu und Mn eine solche Abhängigkeit nicht zu erkennen ist. Das gilt auch für das heißwasserlösliche Bor und Molybdän.

Im Vergleich zur N-modifizierten Braunkohle besitzen die Stallmiste niedrigere  $N_r$ - sowie höhere  $K_r$ - und  $P_r$ -Gehalte in der Trockensubstanz (Asmus et al. 1999; Katzur et al. 2002b). Das zeigt sich bei einer annähernd gleich hohen OS-Gabe in den vergleichsweise niedrigen  $N_{min}$ - und höheren  $K_{(DL)}$ -Gehalten der Versuchsböden, während die Unterschiede bei den  $P_{(DL)}$ -Gehalten vermutlich auf die höhere Löslichkeit der Dünger-/ Bodenphosphate bei den Varianten 2 bis 5 durch die erfolgte HES-Applikation zurückgeführt werden können (vgl. Varianten 1 und 3 in Tabelle IX).

Die vergleichende Bewertung der organischen Dünger erfolgt auf der Grundlage der reproduktionswirksamen organischen Substanz (ROS) (Asmus et al. 1999). Diese beträgt beim Stallmist  $200 \text{ kg ROS pro t Stalldung}$  und wird aus der organischen Trockenmasse (20% OS-TM; OS, organische Substanz) und dem Humusproduktionskoeffizienten 1 berechnet

Tabelle IX. Ausgewählte Kennwerte des Oberbodens (0–20 cm) vom 1. September 2003 der Varianten des Gewächshausversuches „HES-NSG/Burg 2003“ mit Kipp-Kiesreinsand (oj – kss) unter Tomate vom 01. September 2003 ( $n=4$ ).  
 (Table IX. Characteristics chosen from the top-layer soil (0–20 cm) of the variants from the greenhouse test ‘HES-NSG/Burg 2003’ on 1 September 2003 with dump-gravel sand (oj – kss) under tomato ( $n=4$ ) from 1 September 2003.)

Variante	Organische Düngung (dt ha <sup>-1</sup> )		pH <sub>CaCl2</sub>	C <sub>t</sub> (%)	N <sub>t</sub> (‰)	C/N- Verh.	N <sub>min</sub> K <sub>t</sub> (DL) P <sub>(DL)</sub> Mg <sub>(pV)</sub>				EDTA-Auszug				Heißwasserlöslich		
	Stm <sup>a</sup>	HES <sup>b</sup>					(mg 100 g <sup>-1</sup> Boden)	Fe	Zn	Cu	Mn	B	Mo	(mg kg <sup>-1</sup> FB)			
1	300	–	7,05	0,065	0,075	8,9	0,71	<b>2,50</b>	4,65	2,10	17,2	1,5	<0,5	<5	<0,2	<0,4	
2 <sup>c</sup>	–	37,5	7,08	0,048	0,045	10,5	0,28	1,02	4,82	1,30	14,8	1,3	<0,5	<5	<0,2	<0,4	
3	–	75	<b>6,85</b>	0,082	0,082	10,2	1,22	1,38	5,45	2,32	17,8	1,2	≤0,5	<5	<0,2	<0,4	
4	–	150	<b>6,60</b>	<b>0,188</b>	<b>0,125</b>	<b>14,9</b>	<b>1,50</b>	1,32	5,40	<b>3,10</b>	<b>22,0</b>	1,6	<0,5	<5	<0,2	<0,4	
5	–	300	<b>6,32</b>	<b>0,345</b>	<b>0,230</b>	<b>14,8</b>	<b>2,58</b>	1,92	5,68	<b>4,05</b>	<b>27,5</b>	3,1	<0,5	<5	<0,2	<0,4	
$\bar{x}$			6,78	0,146	0,111	11,86	1,26	1,63	5,20	2,58	19,85	1,72	–	<5	<0,2	<0,4	
GD 5%			0,165	0,081	0,045	1,87	1,18	0,93	1,44	1,09	3,33	1,74	–	–	–	–	

<sup>a</sup>Stm, Stallmist (20% OS-TM). <sup>b</sup>HES, Humusersatzstoff (68,3% OS-TM). <sup>c</sup>Vergleichsvariante.

(1000 kg Stalldung  $\times$  20% OS-TM  $\times$  1  $\triangleq$  200 kg ROS t<sup>-1</sup> Stalldung). Die Humusersatzleistung der chemisch veränderten Weichbraunkohle ist mit mindestens 2100 kg ROS/ t HES (1000 kg HES  $\times$  70% OS-TM  $\times$  3) anzugeben und damit um den Faktor 10,5 größer als bei Stalldung, wenn die Humifizierungsrate der organischen Substanz im Mittel bei  $\geq$  60% liegt und der daraus im Vergleich zu Stallmist (20%) abgeleitete Humusreproduktionskoeffizient mit 3 (60% zu 20%) angesetzt wird. Aufgrund dieser Relation könnten 300 dt Stalldung (V1) durch rund 28,6 dt HES in bezug auf die Humusanreicherung ersetzt werden und entsprächen 300 dt HES (V5) ca. 630 dt ROS (Tabelle X).

Die geringeren C<sub>t</sub>-Gehalte bei V2 gegenüber V1 (vgl. Tabelle IX) resultieren aus der deutlich niedrigeren OS-Gabe von 25,6 zu 60,0 dt TM ha<sup>-1</sup> (vgl. Tabelle X). Ein Vergleich der mit der organischen Düngung zugeführten und am 01. September 2003 in der 22,5 cm mächtigen Ackerkrume (d<sub>B</sub> = 1,80 g ccm) ermittelten organischen Substanz ergibt für die Stallmist-Variante 1 eine negative Humusbilanz. Also sind hier größere Anteile der Stallmistgabe mineralisiert worden als über die Wurzelmasse dem Boden zugeführt werden konnten. Die positiven OS-Bilanzen bei V2 bis V5 überraschen, denn beim Anbau von Gemüse ist mit einem Humusschwund zu rechnen, der auf Sandböden durchaus bei 1,5 bis 3,5 t ha<sup>-1</sup> ROS liegen kann (Kundler et al. 1981). Vermutlich enthalten die chemisch veränderten Weichbraunkohlen stoffwechselaktive Substanzen, die das Wurzelwachstum fördern.

Der Humusanreicherung sind ökonomische und ökologische Grenzen gesetzt. Steigende Zuführungen von organischer Substanz führen zwar zum Ansteigen der OS-Bodenvorräte, aber diese Anstiege sind nicht linear, wie bereits die einjährigen Ergebnisse des Gewächshausversuches „HES-NSG/Burg 2003“ vom 17. Februar 2004 (Tabelle XI) und die fünfjährigen Ergebnisse des Freilandversuches „HES-LAUBAG/2001“ vom 26. September 2005 (Tabelle XII) beweisen.

Der Humusgehalt des Bodens ist stets das Ergebnis der Wirkung vieler Faktoren, insbesondere von Bodenart, organischer Düngung, Anbauverhältnis, Intensität der Bewirtschaftung und klimatischen Bedingungen. Daraus ergibt sich ein standort- und nutzungstypischer Humusgehalt. Je weiter man sich von diesem standorttypischen Humusgehalt entfernt, desto höher werden die Mineralisierungsraten und demzufolge N-Freisetzungen sein (Asmus et al. 1999).

Die Humusbilanzen der Kipp-Kiesreinsande lassen für die HES-Varianten 2 bis 5 unter dem Nutzungseinfluss der Gewächshauskultur „Tomate“ zwei gegenläufige Tendenzen erkennen. Die Bilanzen vom 01. September 2003 (unter Tomate) zeigen eine tendenziell mit der HES-Gabe steigende OS-Akkumulationsrate (Tabelle X), während die nach dem Abräumen des Tomatenbestandes erstellten Humusbilanzen vom 17. Februar 2004 eine fallende Tendenz bis hin zum Humusschwund von 58,3 dt OS-TM ha<sup>-1</sup> bei V5 aufweisen (Tabelle XI). Auffällig ist, dass die OS-Bodenvorräte vom 17. Februar 2004 bei V1 bis V3 höher sowie bei V4 und V5 niedriger sind als zum 01. September 2003.

Die Ursache für diese sehr unterschiedlichen Entwicklungen der Humusvorräte unter sonst vergleichbaren Versuchsbedingungen kann indirekt nur in der stofflichen Zusammensetzung der organischen Düngemittel und folglich auch der organischen Bodensubstanz begründet sein. Das gilt insbesondere für das Mengenverhältnis von Huminstoffen (Dauerhumus) zu Nichthuminstoffen (Nährhumus). Die Huminstoffe dienen auf Grund ihrer komplexen und hochmolekularen Struktur in der Regel nicht bzw. nur begrenzt als Energieressource für die Mikroorganismen. Deshalb ist auch bei der HES-Anwendung zwecks Humusanreicherung sowie Stimulans und Förderung bodenbiologischer Aktivitäten auf eine ausreichende Zufuhr von rezenter organischer Substanz in Form von Bestandsabfall, Wurzeln und Ernterückständen zu achten.

Tabelle X. Humusbilanzen vom 1. September 2003 für die Varianten des Gewächshausversuches „HES-NSG/Burg 2003“ mit Kipp-Kiesreinsand (oj – kss) unter Tomate ( $n=4$ ).

(Table X. Humus balances of the variants of the greenhouse test ‘HES-NSG/Burg 2003’ with dump gravel sand (oj – kss) under tomato ( $n=4$ ) from 1 September 2003.)

Variante	Organische Düngung <sup>a</sup>		Zufuhr an organischer Substanz (OS)			OS-Vorräte in der Ackerkrume			Humusbilanz (dt ha <sup>-1</sup> )	
	Dünger	dt ha <sup>-1</sup>	TM (dt ha <sup>-1</sup> )	ROS <sup>b</sup> (dt ha <sup>-1</sup> )	% C <sub>org</sub> Krume <sup>c</sup>	% C <sub>org</sub>	dt TM ha <sup>-1 d</sup>	dt ROS ha <sup>-1 g</sup>	org. TM <sup>e</sup>	ROS <sup>f</sup>
1	Stm	300	60	60	0,086	0,065	45,4	45,4	-14,6	-14,6
2	HES	37,5	25,6	76,8	0,037	0,048	33,5	80,0	+7,9	+3,2
3	HES	75	51,2	153,6	0,073	0,082	57,2	156,0	+6,0	+2,4
4	HES	150	102,4	307,2	0,147	0,188	131,3	318,5	+28,9	+11,6
5	HES	300	204,9	614,7	0,293	0,345	240,9	629,1	+36,0	+14,4

<sup>a</sup>Stm, Stallmist (20% OS-TS); HES, Humusersatzstoff (68,3% OS-TS). <sup>b</sup>Humusproduktionskoeffizienten: Stallmist (Stm): 1,0 (Asmus et al. 1999), Wurzelrückstände: 0,4 (Asmus et al. 1999), N-modifizierte Weichbraunkohle:  $\geq 3,0$ . <sup>c</sup>(dt OS-TM  $\times$  100%) / (1,724  $\times$  40500 dt TM-B) = % C<sub>org</sub> dt C<sub>org</sub> = (dt OS-TM) / 1,724. Krumengewicht: 4050 t ha<sup>-1</sup> (db 1,8 g ccm<sup>-1</sup>). <sup>d</sup>(C<sub>org</sub> (%))  $\times$  1,724 OS-TM  $\times$  40,500 dt Boden) / (100%  $\times$  ha) = dt OS-TM ha<sup>-1</sup>. <sup>e</sup>-<sup>f</sup>Rechenbeispiel (Variante 2): <sup>e</sup>33,5 dt OS - 25,6 dt OS = 7,9 dt Humusakkumulation in OS-TM; <sup>f</sup>8 dt OS-TM  $\times$  0,4 = 3,2 dt Humusakkumulation in ROS; <sup>f</sup>76,8 dt ROS + 3,2 dt ROS = 80 dt Humusvorrat in ROS.

Die Anlieferungsrate von organischer Substanz ist im Gewächshausversuch laut Humusbilanz vom 01. September 2003 fünf Wochen vor Abschluss der Ernteperiode bei den Varianten mit den höchsten Huminstoff- bzw. ROS-Gaben (V4 und V5) am höchsten und bei der Stallmistvariante 1 wegen der vermutlich viel höheren C-Mineralisierungsrate mit einem negativen Vorzeichen zu versehen (Tabelle X). Dieses Ergebnis ist jedoch insofern verfälscht, als dass die in der Humusbilanz miterfasste lebende Wurzelmasse definitionsgemäß nicht zur organischen Substanz des Bodens gehört und die während der Vegetationsperiode laufend abgestoßenen Wurzelhaare nicht als OS-Zufuhr ausgewiesen sind.

Tabelle XI vermittelt einen Eindruck von der Geschwindigkeit der Humusanreicherung und Mineralisierung der überwiegend als Wurzelstreu eingetragenen Ernterückstände. Zunächst fällt auf, dass, wie bereits ausgeführt, die OS-Bodenvorräte vom 17. Februar 2004 bei den Varianten 1 bis 3 um rund 23 bis 46% höher sowie bei V4 und V5 um ca. 20 bis 39% niedriger sind als zum Zeitpunkt der Tomatenernte am 01. September 2003. Offensichtlich wird unter den geprüften Versuchsbedingungen die Humusanreicherung bei OS-Bodenvorräten von  $< 100$  dt OS-TM  $\text{ha}^{-1}$  stärker gefördert, während bei Humusgehalten von  $> 100$  dt OS-TM  $\text{ha}^{-1}$  die Mineralisierungsrate der angelieferten organischen Substanz unter Einbeziehung der bereits im Boden vorhandenen Humusstoffe deutlich zunimmt und so Humusverluste von 26,6 (V4) bzw. 94,3 dt OS-TM  $\text{ha}^{-1}$  (V5) möglich sind. Das ist ein weiteres Indiz dafür, dass zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz ein von den Umweltbedingungen und der Nutzungsform abhängiges Gleichgewicht besteht, die Geschwindigkeit beider Prozesse von den Lebensbedingungen der Bodenorganismen abhängt und die Humusakkumulationsrate in Beziehung zu den Humusvorräten sowie deren stofflicher Zusammensetzung steht. Inwieweit dabei das Massenverhältnis von Nährhumus zu Dauerhumus im Düngemittel und/ oder im Boden von Bedeutung ist, bedarf noch weiterer Untersuchungen. Erste Betrachtungen lassen vermuten, dass die N-modifizierte Weichbraunkohle aufgrund ihres hohen Humifizierungsgrades von  $\geq 60$  bis  $< 90\%$  Einfluss auf die Mineralisierungs- bzw. Humusanreicherungsrate der Ernterückstände nimmt. Darauf verweisen vor allem die für den Beobachtungszeitraum September 2003 bis Februar 2004 erstellten Humusbilanzen und die OS-Vorräte der Ackerkrume vom 17. Februar 2004 in % der organischen Düngung (Tabelle XI). Die Humusanreicherungsrate ist demnach bei Variante 2 (37,5 dt HES  $\text{ha}^{-1}$ ) mit 91,0% der OS-Zufuhr am höchsten und nimmt mit steigenden HES-Gaben ab. Zugleich steigen die C-Mineralisierungsraten an, so dass bei der HES-Gabe von 300 dt  $\text{ha}^{-1}$  (V5) ein Humusschwund von 28,5% der OS-Zufuhr kalkulatativ ermittelt wird, das sind aber nur 3,8% der ROS-Zufuhr.

Da die Bildung und Akkumulation der einigermaßen beständigen organischen Verbindungen (Dauerhumus) die wichtigste Voraussetzung für das Erreichen der standort- und nutzungsabhängigen charakteristischen Humusgehalte ist, lässt sich der Zeitpunkt der Herausbildung eines Gleichgewichts zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz im Boden durch die Applikation von  $\geq 37,5$  bis 300 dt  $\text{ha}^{-1}$  N-modifizierter Braunkohle vermutlich um ein bis zwei Jahrzehnte vorverlegen.

Im Gewächshaus sind unter Tomate auf humusfreiem Kipp-Kiesreinsand bei bodenmliorativen HES-Gaben von 75, 150 und 300 dt  $\text{ha}^{-1}$  (V3 bis V5) die Humusvorräte mit rund 77 bis 147 dt OS-TM  $\text{ha}^{-1}$  deutlich niedriger als im Freiland unter landwirtschaftlichen Kulturen auf einem humusfreien Kipp-Kalklehmsand (vgl. Tabellen XI und XII). Die Humusanreicherungsrate liegen hier im Mittel der Fruchtfolgen bei 42 (ohne HES) bis 63 dt OS-TM  $\text{ha}^{-1}$   $\text{a}^{-1}$  (300 dt HES  $\text{ha}^{-1}$ ) und damit deutlich über denen des Gewächshausversuches. Das zeigt die Auswirkungen des geologischen Ausgangsmaterials der Bodenbildung, der Nutzungsart und Abbauverhältnisse, der Intensität der Bewirtschaftung und der Düngung auf die Humusentwicklung.



Tabelle XI. Ausgewählte Bodenkennwerte und Humusbilanzen vom 17. Februar 2004 für die Varianten des Gewächshausversuchs „HES-Burg/NSG 2003“ mit Kipp-Kiesreinsand (oj – kss) – Mischproben aus zehn Bohrstockproben pro Variante.

(Table XI. Chosen soil characteristics and humus balances for the variants of the greenhouse test 'HES-Burg/NSG 2003' with dump-gravel sand (oj – kss) from 17 February 2004 – mixed samples from ten boring rods for each variant.)

Variante	Bodenkennwerte			Organische Düngung				OS-Vorräte in der Ackerkrume				Humusbilanz				Differenz zwischen den Humusbilanzen vom 17. 2. 2004 zu 1. 9. 2003			
	pH (CaCl <sub>2</sub> )	C <sub>t</sub> (%)	N <sub>t</sub> (%)	C/N Verh.	N <sub>min</sub> (mg 100 g <sup>-1</sup> B.)	(dt ha <sup>-1</sup> )		dt ha <sup>-1</sup>		% der org. Düngung		(dt ha <sup>-1</sup> )		org. TM ROS		org. TM ROS			
						org. TM	ROS	org. TM	ROS	org. TM	ROS	org. TM	ROS	org. TM	ROS	org. TM	ROS		
1	7,2	0,08	0,06	13,3	0,74	60,0	60,0	55,9	55,9	93,2	93,2	93,2	93,2	-4,1	-4,1	+10,5	+10,5		
2	7,0	0,07	0,05	14,0	0,33	25,6	76,8	48,9	86,1	191,0	112,1	112,1	112,1	+23,3	+9,3	+15,4	+6,1		
3	7,0	0,11	0,07	15,7	0,73	51,2	153,6	76,8	163,8	150,0	106,6	106,6	106,6	+25,6	+10,2	+19,6	+7,8		
4	7,2	0,15	0,10	15,0	0,75	102,4	307,2	104,7	308,1	102,2	100,3	100,3	100,3	+2,3	+0,9	-26,6	-10,7		
5	6,8	0,21	0,14	15,0	1,82	204,9	614,7	146,6	591,4	71,5	96,2	96,2	96,2	-58,3	-23,3	-94,3	-37,7		

Tabelle XII. Humusbilanzen vom 26. September 2005 für die Varianten des landwirtschaftlichen Rekultivierungsversuchs „HES-LAUBAG/2001“ auf Kipp-Kalklehm sand (oj – cls).  
(Table XII. Humus balances for the variants of the agricultural re-cultivation test 'HES-LAUBAG/2001' on dump-chalk loamy sand (oj – cls).)

Fruchtfolge	HES-Gabe (dt TM ha <sup>-1</sup> )			Zufuhr an organischer Substanz			OS-Vorräte in der Ackerkrume			Humusanreicherungsrate			organisches TM/ROS- Verhältnis in der Krume		Humusanreicherung in % der Zufuhr	
	TM (dt TM ha <sup>-1</sup> )	ROS (dt TM ha <sup>-1</sup> )	C <sub>org</sub> (%) Krume <sup>a</sup>	TM (dt TM ha <sup>-1</sup> )	ROS (dt TM ha <sup>-1</sup> )	C <sub>org</sub> (%)	TM (dt TM ha <sup>-1</sup> )	ROS (dt TM ha <sup>-1</sup> )	organische TM (dt TM ha <sup>-1</sup> )	ROS <sup>b</sup> (dt TM ha <sup>-1</sup> )	organische TM (dt TM ha <sup>-1</sup> )	organische TM	ROS			
A	0	0	0,0	166,4	66,6	0,33	166,4	66,6	166,4	66,6	(v) <sup>c</sup>	2,50	–			
	75	153,6	0,102	232,0	225,9	0,46	180,8	14,4	180,8	14,4	72,3	1,03	353,1			
	150	307,2	0,203	302,6	387,3	0,60	200,2	33,8	200,2	33,8	80,1	0,78	195,5			
	$\bar{x}$	153,6	0,102	233,7	226,6	0,46	182,5	16,1	182,5	16,1	73,0	1,03	356,4			
B	0	0	0,0	237,0	94,8	0,47	237,0	94,8	237,0	94,8	(v) <sup>c</sup>	2,50	–			
	150	307,2	0,203	388,3	421,3	0,77	285,9	48,9	285,9	48,9	114,4	0,92	279,2			
	300	614,7	0,406	519,4	740,5	1,03	314,5	77,5	314,5	77,5	125,8	0,70	153,5			
	$\bar{x}$	307,2	0,203	381,6	419,0	0,76	279,1	42,1	279,1	42,1	111,7	0,91	272,6			
C	0	0	0,0	221,9	88,8	0,44	221,9	88,8	221,9	88,8	(v) <sup>c</sup>	2,50	–			
	75	153,6	0,102	332,8	266,2	0,66	281,6	59,7	281,6	59,7	23,8	1,25	550,0			
	150	307,2	0,203	368,1	413,5	0,73	265,7	43,8	265,7	43,8	106,3	0,89	259,5			
	$\bar{x}$	153,6	0,102	307,6	256,2	0,61	256,4	34,5	256,4	34,5	102,6	1,20	500,8			
Mittel	0	0	0,0	208,4	83,4	0,41	208,4	83,4	208,4	83,4	(v) <sup>c</sup>	2,50	–			
	75	153,6	0,102	282,4	246,1	0,56	231,2	22,8	231,2	22,8	92,5	1,15	451,6			
	150	307,2	0,203	353,0	407,4	0,70	250,6	42,2	250,6	42,2	100,2	0,87	244,7			
	300	614,7	0,406	519,4	740,5	1,03	314,5	106,1	314,5	106,1	125,8	0,70	153,5			

<sup>a</sup>Krumengewicht: 2925 t ha<sup>-1</sup> (d<sub>B</sub> = 1,30 g ccm<sup>-1</sup>). <sup>b</sup>Humusreproduktionskoeffizient der organischen TM im Mittel mit 0,4 festgelegt. <sup>c</sup>(v), Vergleich.

Die Humusvorräte sind bei der getreidebetonten Fruchtfolge A nach Kartoffel am niedrigsten und bei der Fruchtfolge B unter Luzerne im zweiten Hauptnutzungsjahr am höchsten. Dazwischen sind die OS-Bodenvorräte der Fruchtfolge-Variante C einzuordnen, die nach vier Jahren Luzerne unter nachgebaumtem Hanf ermittelt wurden. Wesentlich ist, dass bereits durch die Ernterückstände beachtliche OS-Gehaltssteigerungen möglich sind, diese aber bei weitem nicht genügen, um die standorttypischen Humusgehalte der Lehmsande von ca. 0,65 bis 0,95% C<sub>org</sub> zu erreichen (Kundler 1981). Da dies langfristig nur über eine Anreicherung der humifizierten organischen Substanzen (Dauerhumus) möglich ist, besitzen die Kalkulationen zu den Bodenvorräten an reproduktionswirksamer organischer Substanz (ROS) eine besondere Bedeutung. Sie belegen, dass durch die Verwendung der N-modifizierten Braunkohle als Humusdüngemittel die ROS-Bodenvorräte von durchschnittlich 83,4 dt ha<sup>-1</sup> (100%) bei der Vergleichsvariante (ohne HES) kurzfristig auf 246,1 (295,1%) bis 740,5 dt ha<sup>-1</sup> (887,9%) bei HES-Gaben von 75 bis 300 dt ha<sup>-1</sup> überdurchschnittlich stark erhöht werden können. Diese Erhöhungen resultieren in erster Linie aus der HES-Anwendung und zu einem geringeren Anteil aus den steigenden Anlieferungen von Wurzel- und Ernterückständen, wie der Analyse der Humusvorräte zu entnehmen ist (Tabelle XII). Den Kalkulationen liegt die Annahme zugrunde, dass keine bzw. vernachlässigbar geringe ROS-Verluste durch Abbau der Huminstoffe aus dem HES und durch Verlagerung der Fulvosäuren und Huminsäuren aus dem HES-behandelten Oberboden in tiefere Bodenschichten eingetreten sind. Demzufolge sind die ROS-Bodenvorräte stets höher als die mit der N-modifizierten Braunkohle dem Boden

Tabelle XIII. Einfluss der bodenmeliorativen HES-Gaben in Kombination mit einer differenzierten N-Mineraldüngung zur Frucht auf die Kornerträge (dt lutro ha<sup>-1</sup>) von Winterweizen und Winter-Triticale – Rekultivierungsversuche „HES I-L/2000“ und „HES II-L/2003“.

(Table XIII. Influence of soil ameliorative HES-amounts in combination with differential N-fertilization to fruit on corn yield (dt lutro ha<sup>-1</sup>) of winter wheat and winter triticale – re-cultivation tests ‘HES I-L/2000’ and ‘HES II-L/2003’.)

N-Mineraldüngung (kg RN ha <sup>-1</sup> )		HES-Gabe in dt ha <sup>-1</sup>					$\bar{x}$	GD 5%
		0 H1	30 H2	75 H3	150 H4			
Winterweizen vom 31. 7. 2003 – HES I-L/2000								
0	N1	0,31	0,68	1,24	0,76	0,75	0,34	
100	N2	6,10	6,96	10,39	3,84	6,82	3,87	
150	N3	5,24	5,34	8,76	3,59	5,73	3,12	
200	N4	6,35	6,17	9,08	5,09	6,67	2,39	
	$\bar{x}$	4,50	4,79	7,37	3,32	4,99	2,22	
	GD 5%	3,77	2,93	1,48	2,36	1,67	WW <sup>a</sup> : 2,55	
F-Test: 12,0/1,89								
Winter-Triticale vom 29.07.2004 – HES II-L/2003								
0	N1	18,7	18,8	36,3	44,5	29,6	8,94	
100	N2	48,0	48,2	53,7	55,9	51,5	12,04	
150	N3	50,8	49,1	45,5	62,0	51,9	10,77	
200	N4	47,8	52,1	53,8	61,8	53,9	10,13	
	$\bar{x}$	41,3	42,1	47,3	56,0	46,7	5,88	
	GD 5%	5,46	7,69	11,72	14,41	5,72	WW <sup>a</sup> : 8,05	
F-Test: 12,6/1,72								

<sup>a</sup>WW, Wechselwirkung HES-Gabe und N-Mineraldüngung.

zugeführten ROS-Gaben. Die daraus abgeleiteten ROS-Anstiegsraten nehmen mit der Höhe der HES-Gabe zu und betragen im Mittel der Fruchtfolgen rund 11% (75 dt HES), 20% (150 dt HES) und 51% (300 dt HES) der bei der Vergleichsvariante akkumulierten Humusmenge von 83,4 dt ROS ha<sup>-1</sup>.

Das Massenverhältnis „organische Trockenmasse (OS-TM) zur ROS“ in der Ackerkrume beträgt bei der Variante „ohne HES“ entsprechend dem Humusreproduktionsfaktor von 0,4 für Gründüngung generell 2,50 zu 1,0 (Tabelle XII). Steigt der Anteil von HES an den ROS-Vorräten an, so wird das Verhältnis zunächst enger und ab < 1,0 zugunsten der ROS-Anteile wieder weiter. Ob und inwieweit dieses Verhältnis für die Geschwindigkeit der Mineralisierung unter Einbeziehung der organischen Dünger von Bedeutung ist, muss noch näher untersucht werden. Sehr wahrscheinlich ist, dass unter denselben Standort- und Nutzungsbedingungen die Mineralisierungsrate der angelieferten organischen Substanz mit der Höhe der HES-Gabe und möglicherweise auch mit der Aufweitung der OS-TM/ROS-Verhältnisse zugunsten der ROS-Bodenvorräte steigt und dementsprechend die Humusakkumulationsrate in % der OS-TM- bzw. ROS-Zufuhr abnimmt (Tabelle XII). Das steht in völliger Übereinstimmung mit der Erkenntnis, wonach die Aufrechterhaltung einer permanent hohen bodenbiologischen Aktivität den ständigen Ersatz der verbrauchten organischen Substanz durch laufende Zufuhr organischer Stoffe zum Boden erfordert (Scheffer & Schachtschabel 1992). Anderenfalls treten Humusverluste auf, die im Extremfall nicht nur den Nährhumus sondern auch den Dauerhumus betreffen (vgl. Tabelle XI).

### *Pflanzenenerträge*

*Landwirtschaftliche Rekultivierungsversuche „HES I-LI2000“ und „HES II-LI2003“.* Der auf einem stark heterogenen Kippenstandort als drittes Fruchtfolgeglied angebaute Winterweizen konnte die Ertrags Erwartungen wegen der extremen Niederschlagsdefizite im I. und II. Quartal 2003 nicht erfüllen (vgl. Tabellen XIII und XV). Dennoch besteht an diesen Ergebnissen ein besonderes Interesse. Sie dokumentieren die positiven Effekte der N-modifizierten Weichbraunkohle auf Ertrag und Widerstandsfähigkeit der Pflanzen gegenüber Trockenheit und Hitze. Die höchsten Kornerträge werden so bei einer bodenmeliorativen HES-Gabe von 75 dt ha<sup>-1</sup> in Kombination mit einer gestaffelten N-Mineraldüngung von 100 kg ha<sup>-1</sup> (H3 × N2) erreicht. Die Erhöhung der HES-Gabe auf 150 dt TM ha<sup>-1</sup> führt bei extremer Trockenheit in der Hauptwachstumsperiode zu signifikanten Mindererträgen. Die relative Ertragswirkung der Humusersatzstoffe ist ohne eine zusätzliche N-Mineraldüngung zur Frucht am höchsten (N1 × H2-4 zu N1 × H1) und nimmt bis zur HES-Gabe von 75 dt ha<sup>-1</sup> mit steigender N-Gabe ab.

Die als erste Hauptfrucht nach der Vorkultur (Gründüngung) angebaute **Winter-Triticale** erbrachte den Nachweis, dass die Kornerträge im Versuchsmittel mit der Höhe der HES-Gabe von 41,3 bis auf 56,0 dt ha<sup>-1</sup> signifikant ansteigen (Tabelle XIII). Der Ertragsanstieg ist bei den Behandlungsvarianten ohne N-Mineraldüngung zur Frucht am höchsten und beträgt hier 25,8 dt Körner ha<sup>-1</sup>. Ähnlich hoch ist der Ertragsanstieg bei den N-Düngungsvarianten von durchschnittlich 29,6 auf 53,9 dt Körner ha<sup>-1</sup>. Die Wechselwirkungen HES-Gabe/ N-Mineraldüngung sind statistisch gesichert und verursachen bei den Varianten H4 × N3-4 die höchsten Körnererträge mit rund 62 dt ha<sup>-1</sup>, gefolgt von H4 × N2 mit ca. 56 dt ha<sup>-1</sup>.

*Gewächshausversuch „HES-NSG|Burg 2003“.* Der Eignungstest chemisch veränderter Weichbraunkohle als Bodenverbesserungsmittel und als Ersatz für Stallmist mit gärtnerischen

Kulturen auf Kipp-Kiesreinsand ist eine Härtefallprüfung. Dabei sind die nach dem Anwendungsjahr gewonnenen Ergebnisse von besonderem Interesse, denn zu diesem Zeitpunkt ist die Nährstoffwirkung der N-modifizierten Braunkohle weitgehend abgeklungen und die Ertragswirkung der organischen Substanzen (Humuswirkung) tritt stärker hervor. Deshalb werden hier nur die Erträge (verkaufsfähige Ware) der nach der Tomate angebauten Gurke diskutiert (Tabelle XIV).

Die organische Düngung mit 300 dt ha<sup>-1</sup> Stallung (Rottemist) bewirkte in Abhängigkeit von der Höhe der N-Mineraldüngung zur Frucht Gurkenenerträge von 46,8 bis 53,3 kg und im Mittel von 49,1 kg pro Parzelle, das sind ca. 930 dt ha<sup>-1</sup>. Ähnlich hohe Durchschnittserträge werden bereits bei der Anwendung von 37,5 dt HES ha<sup>-1</sup> erzielt. Die Erträge steigen bei HES-Gaben von 37,5 bis 150 dt ha<sup>-1</sup> tendenziell mit der Höhe der N-Mineraldüngergabe an, während bei HES-Aufwendungen von 300 dt ha<sup>-1</sup> ein gegenläufiger Trend zu verzeichnen ist. Die höchsten und gegenüber der Vergleichsvariante „Stallung + 180 kg N“ statistisch gesichert höheren Gurkenenerträge werden erreicht, wenn 300 dt HES ha<sup>-1</sup> kombiniert mit 180 oder 360 kg N ha<sup>-1</sup> (ca. 1102 bis 1140 dt Gurken ha<sup>-1</sup>) bzw. 37,5 dt HES ha<sup>-1</sup> in Kombination mit 720 kg N ha<sup>-1</sup> zur Frucht appliziert werden. Damit ist bewiesen, dass die N-modifizierte Weichbraunkohle zur Substitution von Stallung eingesetzt werden kann. Beeindruckend sind die positiven Effekte des Humusersatzstoffes auf Wachstum, Qualität und Gesundheit der Pflanzen sowie auf die Chlorophyll- und Blütenbildung. Aber ebenso erwähnenswert ist der intensive Geschmack der Früchte.

*Landwirtschaftlicher Rekultivierungsversuch „HES-LAUBAG/2001“.* Die Fruchtfolgen A bis C entsprechen nicht der in allen Belangen optimierten Rekultivierungsstrategie (Werner et al. 1982). Davon weichen sowohl der Anbau von Kartoffel bzw. Luzerne als erstes Glied der Rekultivierungsfurchtfolgen B bzw. C als auch das unausgewogene Verhältnis von Halmfrucht (Getreide) zu Blattfrucht (Luzerne) in den Fruchtfolgen A und C ab. Der wesentliche Grund dafür ist, dass der Eignungstest von N-modifizierter Weichbraunkohle als Humusdüngemittel in kürzester Zeit mit möglichst vielen Feldfruchtarten erfolgen sollte.

Der Anbau von **Kartoffeln** als erstes Glied der Fruchtfolge B ist ebenfalls ein „Härtefall“, denn die Kartoffel stellt hohe Ansprüche an die Nährstoff- und Humusversorgung der Böden. Bei der mittelspäten Kartoffelsorte „Afra“ bewirken HES-Gaben von 150 dt TM ha<sup>-1</sup>

Tabelle XIV. Gurkenenerträge (5,28 kg m<sup>-2</sup>) von 2004 auf Kipp-Kiesreinsand (oj – kss)-Gewächshausversuch „HES-NSG/Burg 2003“.

(Table XIV. The 2004 cucumber yields (5.28 kg m<sup>-2</sup>) on dump gravel sand (oj – kss) greenhouse test ‘HES-NSG/Burg 2003’.)

N-Mineral-düngung zur Frucht (kg RN ha <sup>-1</sup> )	Bodenverbesserungsmittel (BVM)						
	Stallung (300 dt ha <sup>-1</sup> )	HES-Gabe (dt lutro ha <sup>-1</sup> )				$\bar{x}$	GD 5%
		37,5	75	150	300		
180	46,8	48,5	42,7	46,2	60,2	48,9	11,36
360	49,7	49,6	49,4	50,4	58,2	51,5	9,81
540	46,6	53,4	48,4	54,4	55,4	51,6	10,32
720	53,3	58,2	54,0	57,6	56,6	55,9	14,64
$\bar{x}$	49,1	52,4	48,6	52,2	57,6	52,0	4,82
GD 5%	7,01	11,86	9,30	9,62	8,24	WW: 9,64	
						F-Test: 3,49/2,78	

Tabelle XV. Mittlere Pflanzenerträge der Meliorationsvarianten des Rekultivierungsversuches „HES-LAUBAG/2001“.  
(Table XV. Average plant yields of the amelioration variants for the re-cultivation test 'HES-LAUBAG/2001'.)

Fruchtfolge	Variante	HES-Gabe (dt TM <sup>a</sup> ha <sup>-1</sup> )	Jahr/ Fruchtfolgeglied												
			2001 Senf (Gründün- gung)	2002 Winterroggen		2003 Winterweizen		2004 Wintergerste		2005 Kartoffel		Gesamt	Stroh	Gesamt	„Adretta“ (dt FM <sup>b</sup> ha <sup>-1</sup> )
Korn		Korn		Korn		Korn		Korn		Korn					
A	1	0	Keine	23,5	29,2	52,7	3,1	1,1	4,2	26,6	32,7	59,3	281,7	141,4	
	2	75	Ertrags- mittlung	28,2	35,3	63,5	5,8	2,7	8,5	39,9	36,6	76,5	320,4	176,8	
	3	150		34,6	43,2	77,8	11,2	4,7	15,9	47,7	41,1	88,7	388,6	218,6	
	$\bar{x}$			28,8	35,9	64,7	6,69	2,8	9,5	38,1	36,8	74,9	330,2	178,9	
	GD 5%			6,61	6,52	12,60	2,63	0,57	2,95	10,40	7,20	20,00	54,04	n.b.	
					2002 Winterweizen		2003 Luzerne		2004 Luzerne		2005 Luzerne				
					Kartoffel		Kartoffel		Kartoffel		Kartoffel				
					„Afra“		„Afra“		„Afra“		„Afra“				
					(dt FM <sup>b</sup> ha <sup>-1</sup> )		(dt FM <sup>b</sup> ha <sup>-1</sup> )		(dt FM <sup>b</sup> ha <sup>-1</sup> )		(dt FM <sup>b</sup> ha <sup>-1</sup> )				
	B	1	0	131,6	22,1	15,0	37,1	Totalausfall		304,8	78,9	494,8	128,5	172,2	
2		150	147,1	26,9	18,0	44,9	(Trockenheit) und		314,6	84,0	507,0	125,0	185,2		
3		300	121,3	28,0	17,6	45,7	Neuansaat		349,4	91,5	561,5	136,5	192,4		
$\bar{x}$			133,3	25,7	16,9	42,6			322,9	84,8	521,1	130,0	183,3		
GD 5%			23,22	2,79	3,19	5,47			27,17	3,54	34,01	7,63	n.b.		

(continued)

Tabelle XV. (Continued).

Fruchtfolge	Variante	HES-Gabe (dt TM <sup>a</sup> ha <sup>-1</sup> )	Jahr/ Fruchtfolgeglied										
			2001 Luzerne		2002 Luzerne		2003 Luzerne		2004 Luzerne		2005 Hanf		
			FM <sup>b</sup>	TM <sup>a</sup>	FM <sup>b</sup>	TM <sup>a</sup>	FM <sup>b</sup>	TM <sup>a</sup>	FM <sup>b</sup>	TM <sup>a</sup>	FM <sup>b</sup>	TM <sup>a</sup>	
C	1	0	51,4	11,5	286,0	85,7	192,8	80,0	327,6	83,1	210,7	64,7	172,8
	2	75	57,4	<b>13,2</b>	289,4	83,0	<b>160,8</b>	<b>65,5</b>	<b>266,6</b>	<b>70,6</b>	<b>237,6</b>	<b>101,4</b>	190,9
	3	150	58,0	<b>12,8</b>	<b>298,3</b>	88,4	183,9	73,8	329,3	85,7	<b>228,3</b>	62,1	172,3
	$\bar{x}$		55,60	12,5	291,2	85,7	179,2	73,1	307,8	79,8	225,5	76,1	178,60
	GD 5%		9,73	0,61	6,96	5,63	18,14	9,60	18,60	6,50	15,0	24,20	n.b.
			(dt ha <sup>-1</sup> )										
			Jahresniederschlag (mm)										
I. Quartal			116,1		132,6		80,8		128,7		106,0		
II. Quartal			102,9		169,3		82,7		123,1		146,2		
III. Quartal			192,2		220,4		118,9		179,3		301,2		
IV. Quartal			117,9		189,3		102,7		158,8		113,6		
Summe			529,1		711,6		385,1		589,9		667,0		

<sup>a</sup>TM, Trockenmasse atro. <sup>b</sup>FM, Frischmasse. <sup>c</sup>Getreideschlüssel (Autorenkollektiv 1993): 1 dt Getreide (86% TM) = 1,00 GE, 1 dt Luzerne (FM) = 0,14 GE, 1 dt Kartoffel (FM) = 0,25 GE, 1 dt Hanf (86% TM), (Samen und Stroh) = 0,70 GE, 1 dt Winterhalmstroh = 0,10 GE, 1 dt Wintergerstenstroh = 0,15 GE.

( $\hat{=}$  236 kg N<sub>MDA</sub> ha<sup>-1</sup>) geringe Mehrerträge gegenüber der rein mineralischen Düngungsvariante (160 kg N ha<sup>-1</sup>) und solche von 300 dt TM ha<sup>-1</sup> ( $\hat{=}$  473 kg N<sub>MDA</sub> ha<sup>-1</sup>) einen Ertragsrückgang (Tabelle XV). Durch die HES-Anwendung werden sowohl N-, Mg- und K-Bodenvorräte erhöht als auch das Nährstoffspeicherungs- und Nährstofftransformationsvermögen der Kippsubstrate verbessert. Infolgedessen sind die N-, Ca-, Mg-, K- und P-Gehalte in den Kartoffelknollen der HES-behandelten Parzellen höher als bei der Vergleichsvariante (Katzur et al. 2003b). Der Ertragsrückgang bei der Variante „300 dt TM HES ha<sup>-1</sup>“ lässt sich unter anderem mit einem verstärkten Auftreten von NH<sub>3</sub> erklären, das bei schwach alkalischer Bodenreaktion (pH<sub>KCL</sub> 7,1–8,0) entsteht und als starkes Plasmagift die Pflanzen schädigt. Diese Gefahr besteht bei einer HES-Applikation von 150 dt TM ha<sup>-1</sup> nicht, obwohl die Knollenerträge auch hier nicht befriedigen können. Die erst im vierten Jahr nach der HES-Applikation angebaute mittelfrühe Kartoffelsorte „Adretta“ (Fruchtfolge A) erbrachte bei wesentlich günstigeren Niederschlagsverhältnissen und einer HES-Gabe von 150 dt TM ha<sup>-1</sup> einen Knollenertrag von 388,6 dt ha<sup>-1</sup>, der um beachtliche rund 107 dt ha<sup>-1</sup> höher war als bei der Vergleichsvariante „ohne HES“ (vgl. Tabelle XV).

Die bei der **Luzerne** (Sorte Diana) als erstes Glied der Rekultivierungsfruchtfolge C erzielten Erträge sind zum Teil sehr widersprüchlich und lassen keinen eindeutigen Bezug zur Bodenbehandlung erkennen. Die niedrigsten Erträge werden im Ansaatjahr und im Trockenjahr 2003 ermittelt. Die ertragssteigernde Wirkung der Humusdüngung tritt deutlicher hervor, wenn die Luzerne (Sorte Europa) erst im dritten Rekultivierungsjahr und nach Applikation von 300 dt HES ha<sup>-1</sup> (Fruchtfolge B) angebaut wird. Zu diesem Zeitpunkt sollten mögliche Schadwirkungen hoher N-Gaben auf die Entwicklung sowohl der Luzerne als auch der symbiotisch lebenden Knöllchenbakterien weitgehendst behoben sein. Außerdem sind bei der Fruchtfolge B die P<sub>(DL)</sub>-Bodenvorräte stärker erhöht worden (Tabelle VIII), so dass die Bedingungen für den Luzerneanbau hier wesentlich günstiger sind als bei der Fruchtfolge C.

Der in der Fruchtfolge A als erste Hauptfrucht nach der Gründüngung (Testkultur) angebaute **Winterroggen** (Sorte Nikita) erbrachte bei bodenmeliorativen HES-Gaben von 75 (V2) und 150 dt TM ha<sup>-1</sup> (V3) sehr beachtliche Mehrerträge von insgesamt rund 11 und 25 dt ha<sup>-1</sup> Biomasse (atro). Die signifikant höheren Korn- und Stroherträge werden jedoch nur bei Variante 3 erzielt (Tabelle XV). Das Korn–Stroh-Verhältnis ist bei allen Varianten annähernd gleich. Bemerkenswert ist, dass steigende HES-Gaben in Kombination mit einer geteilten N-Mineraldüngung (100 + 50 kg N ha<sup>-1</sup>) zur Frucht keine steigenden N<sub>t</sub>-Gehalte in den Haupt- und Nebenprodukten verursachen und demzufolge die höheren Korn- und Stroherträge bei V2 und V3 auf eine bessere Ausnutzung des Boden- und Mineraldüngestoffs zurückführbar sind. Als weitere Ursache ist die „Humuswirkung“ zu nennen, die bei V3 aufgrund der höheren HES-Gabe stärker ausgeprägt sein dürfte. Da die N-Entzüge mit der HES-Gabe beim Korn von 47,7 (V1) bis auf 61,7 N ha<sup>-1</sup> (V3) steigen und beim Stroh mit durchschnittlich 30,4 kg N ha<sup>-1</sup> nahezu identisch sind, kann bei der Variante 3 eine annähernd optimale N-Ernährung des Winterroggens unterstellt werden.

Der **Winterweizen** (Sorte Bandit) von 2002 als Nachfrucht zu Kartoffel in der Rekultivierungsfruchtfolge B erhielt zu Vegetationsbeginn 100 kg N ha<sup>-1</sup> und zum Zeitpunkt des Schossens 50 kg N ha<sup>-1</sup>. Die auf Alt-Ackerland mit einer N-Gabe von 150 kg ha<sup>-1</sup> angestrebten Ertragsziele von ca. 55 dt ha<sup>-1</sup> Körner (86% TS) werden auch bei der ertragsstärksten Variante 3 (300 dt TM ha<sup>-1</sup> HES) mit rund 33 dt ha<sup>-1</sup> Körner (86% TS) nicht erreicht. Dennoch ist der realisierte Ertrag aufgrund des unbefriedigenden Kulturzustandes der Kippenböden zu Rekultivierungsbeginn beachtlich und signifikant höher als bei der Mineraldüngungsvariante V1. Besonders hervorzuheben sind das sehr enge Korn–Stroh-Verhältnis von durchschnittlich 1 : 0,66. Auch der in der Fruchtfolge A nach Winterroggen angebaute Winterweizen von 2003 (Sorte Ritmo) erbringt den Nachweis, dass die signifikant



höheren Körnerträge bei den HES-Varianten 2 (75 dt TM ha<sup>-1</sup>) und 3 (150 dt TM ha<sup>-1</sup>) erzielt werden. Die Ertragsanstiege sind im Trockenjahr mit rund 187% (V2) und 361% (V3) extrem hoch und bestätigen die positiven Effekte der chemisch veränderten Weichbraunkohle auf die Widerstandsfähigkeit der Pflanzen gegenüber Stress (Trockenheit, Hitze, Salzgehalt des Bodens).

Auch bei der nachgebauten **Wintergerste** von 2004 (Sorte Franziska) in Fruchtfolge A werden die höchsten Körnererträge bei V3 mit 47,7 dt (atro) bzw. 55,5 dt (86% TS) pro Hektar erzielt, gefolgt von V2 mit 46,4 und V1 mit 30,9 dt ha<sup>-1</sup> (86% TS). Das Korn – Stroh-Verhältnis sinkt von 1 : 1,23 (V1) über 1 : 0,92 bis auf 1 : 0,86 ab. Gleichzeitig nimmt mit steigenden Korn- und Stroherträgen die N-Konzentration in den Haupt- und Nebenprodukten ab. Demnach haben Humusdüngung und steigende bodenmeliorative HES-Gaben die Effektivität der N- und vermutlich auch der P-Mineraldüngung deutlich verbessert.

Nach Luzerneumbruch wurde 2005 **Hanf** (Sorte Felina 32) angebaut (Fruchtfolge C). Die signifikant höheren Frischmasseerträge werden bei den HES-Varianten ermittelt. Im Hinblick auf die TM-Erträge überrascht Variante 2 (75 dt TM ha<sup>-1</sup> HES) durch einen zur Frischmasse unverhältnismäßig hohen Mehrertrag. Deshalb können methodische Fehler bei der Entnahme der Pflanzenproben zur TM-Bestimmung nicht ausgeschlossen werden.

Die für den fünfjährigen Beobachtungszeitraum nach dem Getreideeinheiten-Schlüssel (Autorenkollektiv 1993) ermittelten **Gesamterträgen** sind in der getreidebetonten Fruchtfolge A bei bodenmeliorativen HES-Gaben von 150 dt TM ha<sup>-1</sup> mit 218,6 GE ha<sup>-1</sup> am höchsten. Das entspricht einem mittleren Jahresertrag von rund 55 GE ha<sup>-1</sup>, wenn das erste Jahr unberücksichtigt bleibt. Dieses diente ausschließlich der Gründüngung (Testkultur) und war so integraler Bestandteil des Meliorationsverfahrens. Die GE-Gesamterträge der Varianten 2 und 3 der Fruchtfolge B sind mit rund 185 bzw. 192 GE ha<sup>-1</sup> ebenfalls bemerkenswert hoch, zumal in 2003 wegen der extremen Trockenheit keine Luzerneerträge erzielt wurden.

Ein Vergleich der Pflanzenerträge bestätigt den höheren Gebrauchswert der mit bodenmeliorativen HES-Gaben von  $\geq 75$  bis 300 dt TM ha<sup>-1</sup> behandelten Kippsubstrate. Auf den HES-behandelten Kipp-Kalklehmsanden wurden bei Winterroggen, Wintergerste, Triticale, Luzerne und Kartoffel ähnlich hohe oder höhere Naturalerträge erzielt wie im Durchschnitt von 1991 bis 1998 auf dem Alt-Ackerland des Landes Brandenburg. Hier waren bei Winterroggen 38,3, Wintergerste 46,0 und Triticale 47,2 dt ha<sup>-1</sup> Korn (86% TS), bei Luzerne 79,5 dt ha<sup>-1</sup> TM lutro sowie bei mittelfrüher und später Kartoffel 321,6 dt ha<sup>-1</sup> Knollen geerntet worden (Agrarbericht 2000). Nur die Winterweizen erträge waren mit durchschnittlich 52,6 dt ha<sup>-1</sup> Körner deutlich höher als auf dem Neuland.

Die Bedeutung der vorgestellten Ergebnisse mag für Deutschland mit seiner agraren Überproduktion weniger spektakulär sein als für Länder mit einem hohen und/oder wachsenden Anteil von durch Bodenabtrag und/ oder Übernutzung geschädigten Böden sowie für Länder, in denen die Rückgewinnung landwirtschaftlicher Nutzflächen sowie die Begrünung und Aufforstung verwüsteter Ländereien eine wichtige Voraussetzung zur Nachhaltigkeitssicherung regionaler Entwicklungen sind. Die N-modifizierte (huminstoffreiche) Weichbraunkohle ist aber gleichermaßen für den Hobbygärtner wegen ihrer Wirksamkeit als Bio-Katalysator und Bio-Stimulans für die Pflanzen ein sehr attraktives Produkt, das zudem über eine sehr hohe Humusersatzleistung verfügt und problemlos gelagert werden kann.

## Schlussfolgerungen

Die durch oxidative Ammonolyse chemisch veränderte Weichbraunkohle ist ein wertvolles organisches Bodenverbesserungsmittel mit N-Düngewirkung im Anwendungsjahr, das bei

der landwirtschaftlichen Rekultivierung von Kippen und Halden des Braunkohlenbergbaus in Gaben von  $\geq 75$  bis  $300 \text{ dt TM ha}^{-1}$  zur nachhaltigen Verbesserung der  $C_{\text{org}}$ - und  $N_{\text{r}}$ -Bodenvorräte, Austauschkapazität sowie des Nährstoffspeicherungs- und Nährstofftransformationsvermögens humusfreier Kippenböden eingesetzt werden kann.

Die in den Kipp-Lehmsanden anzustrebenden Mindestgehalte an organischer Substanz von 0,66 bis 0,73%  $C_{\text{org}}$  werden im Freilandversuch bereits nach viereinhalb Jahren erreicht, wenn ca. 154 bzw. 307 dt ROS  $\text{ha}^{-1}$  in Form N-modifizierter Weichbraunkohle (75 und 150 dt TM  $\text{ha}^{-1}$ ) den Kippenböden zugeführt und zwei bis vier Jahre lang Luzerne angebaut werden. Bei HES-Gaben von 300 dt TM  $\text{ha}^{-1}$  ( $\triangleq 615 \text{ dt ROS ha}^{-1}$ ) steigen die  $C_{\text{org}}$ -Gehalte in der Ackerkrume auf ca. 1 Masse-% an.

Das standort- und nutzungstypische  $C_{\text{org}}$ -Sättigungsniveau ist in den Kippenböden durch die Verwendung der N-modifizierten Weichbraunkohle als organisches Düngemittel vermutlich um mindestens zehn bis 20 Jahre früher erreichbar als über die Wurzel- und Ernterückstände der in der Rekultivierungsperiode angebauten Fruchtarten.

Kalkulativ ermittelte Humusbilanzen belegen, dass sowohl im Freiland als auch im Gewächshaus (i) zwischen Anlieferung und Abbau der organischen Substanz im Boden ein von den Umweltbedingungen und der Nutzungsform abhängiges Gleichgewicht besteht und (ii) die Humusanreicherungsrate in Beziehung zu den Humusvorräten und vermutlich auch zu deren stofflichen Zusammensetzung steht.

Der Humusakkumulation sind ökologische Grenzen gesetzt. Steigende Zuführungen von organischer Substanz führen zwar zum Anstieg der OS- und ROS-Bodenvorräte, aber gleichzeitig nehmen die Humusanreicherungsraten (in % der OS-Zufuhr) ab und dementsprechend die Mineralisierungsraten, vornehmlich der über den Bestandsabfall sowie die Wurzel- und Ernterückstände angelieferten organischen Substanz (Nährhumus), zu.

Die OS- und ROS-Bodenvorräte sind in den HES-gedüngten Kippenböden stets höher als bei den Vergleichsvarianten (ohne HES bzw. mit 300 dt  $\text{ha}^{-1}$  Stallmist) und steigen mit der Höhe der HES-Gabe an. Durch die HES-Applikation werden das Massenverhältnis von Nährhumus zu Dauerhumus zugunsten der mikrobiell schwer abbaubaren Fulvosäuren und Huminsäuren verschoben und dadurch vermutlich die Mineralisierung der angelieferten organischen Substanz (Nährhumus) unter Ausnutzung des HES-Stickstoffs stärker gefördert als die Humifizierung.

Die N-modifizierte Weichbraunkohle ist nach raschem Verbrauch ihrer leicht verwertbaren Bestandteile weitgehend resistent gegenüber mikrobiellem Abbau. Deshalb sollte die HES-Anwendung zwecks Initiierung und Aufrechterhaltung einer permanent hohen bodenbiologischen Aktivität auch mit einer ausreichenden Zufuhr von Nährhumus durch Grün- oder Strohdüngung und den Anbau von Pflanzen mit reichlich liefernden Wurzel- und Ernterückständen kombiniert werden.

Nach Aufbrauch des gelösten und leichter mobilisierbaren Stickstoffs aus dem Humusdüngestoff steigt der Anteil des fest organisch gebundenen Stickstoffs und damit der schwer mineralisierbaren N-Verbindungen an den überwiegend organisch gebundenen  $N_{\text{r}}$ -Bodenvorräten an. Die Folgen sind (trotz steigender  $N_{\text{r}}$ -Gehalte) geringere N-Mineralisierungsraten ( $N_{\text{min}}$  in % von  $N_{\text{r}}$ ) und weitere  $C_{\text{org}}/N_{\text{r}}$ -Verhältnisse in den HES-gedüngten Kippenböden, was, wie in der landwirtschaftlichen Praxis üblich, durch eine entsprechende N-Mineraldüngung zu kompensieren ist.

Bodenchemische und ertragskundliche Untersuchungen bestätigen, dass 300 dt  $\text{ha}^{-1}$  Stallmist (20% TS) im Hinblick auf die Humusersatzleistung bereits durch etwa 30 dt TM  $\text{ha}^{-1}$  chemisch veränderter Weichbraunkohle (68,3% OS-TM) ersetzt werden können.

Die bodenverbessernden Effekte der HES-Düngung bewirken signifikante Ertragssteigerungen. So sind die Naturalerträge von Winterroggen, Wintergerste, Triticale, Luzerne und

mittelfrüher Kartoffel auf den mit N-modifizierter Weichbraunkohle behandelten Kipp-Kalklehmsanden ähnlich hoch wie bzw. höher als im Durchschnitt von 1991 bis 1998 auf dem Alt-Ackerland des Landes Brandenburg.

Rekultivierungsfruchtfolgen respektive Fruchtarten beeinflussen signifikant die Bodenkennwerte und Effektivität der HES-Anwendung. Die Fruchtfolge mit einem Anbauverhältnis von 75% Wintergetreide und 25% Kartoffeln erbringt bei bodenmeliorativen HES-Gaben von 150 dt TM ha<sup>-1</sup> im Frühjahr zusammen mit einer Gründüngung (Senf) den höchsten mittleren Jahresertrag von 54,6 GE ha<sup>-1</sup>, der um rund 55% höher ist als bei den Vergleichsvarianten (ohne HES) mit 35,4 GE ha<sup>-1</sup>.

Beachtliche bodenmeliorative Effekte bewirkt die HES-Düngung in Kombination mit dem Luzerneanbau, der nicht zu Rekultivierungsbeginn, sondern erst nach Gründüngung (Testkultur Senf) und 2 × Wintergetreide im dritten bis fünften Rekultivierungsjahr erfolgen sollte. Danach können Kartoffel, gefolgt von Winterweizen und Wintergerste angebaut werden.

Die HES-Applikation beeinflusst nachhaltig die Nährstoffversorgung und erhöht die Widerstandsfähigkeit der nachfolgend angebauten Pflanzen gegenüber Stress.

### Danksagung

Die Arbeit wurde mit Mitteln der Vattenfall Europe Mining AG und der Sanierungsgesellschaft der Niederlausitz GmbH (NSG) gefördert.

### Literatur

- AG Boden. 2005. Bodenkundliche Kartierung. 5. verb. u. erw. Aufl., Hannover.
- Agrarbericht. 2000. Bericht zur Lage der Land- und Ernährungswirtschaft des Landes Brandenburg. Hrsg.: Min. f. Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, Potsdam, Germany.
- Altermann M, Knauf C, Mautschke J, Schröder H, Hurtig H, Rau D, Wünche M, Gatzke A. 1979. Arbeitsrichtlinie Bodengeologie. Halle, Germany: VEB Geologische Forschung und Erkundung.
- Asmus F, Schiemann M, Roschke M, Zimmermann K-H. 1999. Effektive und umweltverträgliche agrarische Düngung. Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, Land Brandenburg.
- Autorenkollektiv. 1993. Faustzahlen für die Landwirtschaft und Gartenbau. 12. Auflage. Münster-Hiltrup, Germany: Landwirtschaftsverlag GmbH.
- Autorenkollektiv. 2000. Rahmenempfehlungen zur Düngung 2000 im Land Brandenburg. Hrsg.: Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg, Potsdam, Germany.
- Flaig W. 1968. Einwirkung von organischen Bodenbestandteilen auf das Pflanzenwachstum. *Landwirt Forsch* 21:103–107.
- Flaig W, Schobinger U, Deuel H. 1959. Umwandlung von Lignin in Huminsäuren bei der Verrottung von Weizenstroh. *Chem. Ber.* 92(8): 173–198.
- Gunschera G. 1978. Landwirtschaftliche Rekultivierungsmaßnahmen auf quartären bindigen Kippstandorten in der Niederlausitz [Diss.]. AdL der DDR, Berlin, Germany: 160S.
- Katzur J, Fischer K, Schiene R. 1999. Organische Düngemittel sowie Verfahren zu seiner Herstellung und Verwendung. Az. 19859068.7–41, Anmeldungs-Nr. 2661 977.
- Katzur J, Fischer K, Böcker L, Liebner F, Schiene R. 2002a. Gefäß- und Freilandversuche zur Eignung von Braunkohle als Bodenverbesserungsmittel. *Arch Acker Pfl Boden.* 48:241–255.
- Katzur J, Fischer K, Böcker L, Liebner F, Schiene R. 2002b. Kennwerte und Eigenschaften der auf Braunkohlebasis durch oxidative Ammonolyse hergestellten Humusdüngestoffe. *Arch Acker Pfl Boden.* 48:637–646.
- Katzur J, Fischer K, Böcker L, Tonder K, Liebner C. 2002c. Auswirkungen der durch oxidative Ammonolyse chemisch veränderten Braunkohle auf die Bodenbiologie. *Arch Acker Pfl Boden.* 48:647–661.
- Katzur J, Fischer K, Böcker L, Liebner F, Schiene R. 2003a. Düngewirkung der N-modifizierten Braunkohle auf ihre Auswirkungen auf Pflanze, Boden und N-Auswaschungsverluste. *Arch Acker Pfl Boden.* 49:61–76.
- Katzur J, Fischer K, Böcker L, Schiene R. 2003b. Freilandversuche zur Eignung chemisch veränderter Weichbraunkohle als Bodenverbesserungsmittel bei der landwirtschaftlichen Rekultivierung humusfreier Kippenböden. *Arch Acker Pfl Boden.* 49:639–653.

- Katzur J, Fischer K, Böcker L, Liebner F, Tonder K, Liebner C, Hettrich K, Sorge R, Ninnemann H. 2003c. Untersuchungen zur Eignung neuartiger Humusstoffe als Bodenverbesserungsmittel bei der Rekultivierung von Bergbauflächen und Sanierung von Problemstandorten. BMBF-Abschlussbericht. FKZ: 0339739. Finsterwalde, Germany: FIB Finsterwalde und Tharandt. Germany: Institut für Pflanzen und Holzchemie.
- Kopp E. 1969. Der Einfluss der organischen kohlehaltigen Beimengungen auf den Kulturwert der pleistozänen und miozänen Deckgebirgsmassen der Niederlausitzer Tagebaue [Diss.]. Humboldt Universität, Berlin, Germany: 160S.
- Kundler P. 1981. Regeln und Richtwerte zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit. Markkleeberg, Germany: agrarbuch.
- Marcusson J. 1927. Der chemische Aufbau der Braunkohle. *Z angew Chem.* 40:1104–1106.
- Naundorf W, Schwinum S, Wollenberger R. 2000. Eigenschaften von Weichbraunkohlen nach der Nassaufschlussmahlung. *Surface Mining.* 52:519–525.
- Scheffer F, Schachtschabel P. 1992. Lehrbuch der Bodenkunde. 12. neu bearb. Auflage. Stuttgart, Germany: Enke Verlag.
- Schröder D, Haubold M, Henkes L. 1987. Humusgehalt und biologische Eigenschaften rekultivierter Böden aus Löß. *Landw. Zeitschrift.* 21:1466–1469.
- Weber E. 1976. Grundriss der biologischen Statistik. 6. Auflage. Jena, Germany: VEB Gustav Fischer Verlag.
- Werner K, Brier E, Einhorn W, Gunschera G, Vogler E. 1982. Rekultivierung von Kippen des Braunkohlenbergbaus. agrar-Broschüre. Landwirtschaftsausstellung der DDR, Markkleeberg. Hrsg.: Akademie der Landwirtschaftswissenschaften der DDR.