

# Auswirkungen von Biokohlesubstrat-Gaben zu ertragsschwachen Ackerböden auf das Sickerwasser und die Nährstofffrachten in einem mehrjährigen Lysimeterversuch

Anne Rademacher<sup>1,2\*</sup> und Michael Haubold-Rosar<sup>1</sup>

## Zusammenfassung

Mittels Lysimeterversuchen werden die Effekte von Biokohlesubstrat (BKS)-Gaben auf die Menge und Qualität der Sickerwässer ertragsschwacher Böden in Nordostdeutschland untersucht. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass der Einsatz von 90 t TM BKS ha<sup>-1</sup> ein Nährstoff-Überangebot in der untersuchten Podsol-Braunerde aus Sand erzeugt und die Pflanzenerträge geringer sind als nach reiner Minereraldüngung. Nach der BKS-Gabe kommt es deshalb zu einer verstärkten N- und K-Auswaschung. Die Effekte werden abgeschwächt durch die Staffelung der BKS-Gabe über drei Anbaujahre. In einem humus- und nährstoffarmen Kippboden führen die gleichen BKS-Gaben zu einer Verbesserung des Pflanzenwachstums und einer Verringerung der Sickerwasserbildung ab dem zweiten Rekultivierungsjahr. Die N- und K-Frachten werden reduziert. Für die Rekultivierung von Kippböden stellt der Einsatz von Biokohlesubstraten somit eine vielversprechende Option dar.

*Schlagwörter:* Biokohlesubstrat, Rekultivierung, Sickerwasser, Nährstoffaustrag, Lysimeter

## Summary

The impact of biochar substrates (BKS) on the amount and quality of the seepage water in unproductive soils of North-Eastern Germany has been investigated by lysimeter trials. Previous results show that application of 90 t BKS ha<sup>-1</sup> (dry matter) induces an oversupply with nutrients in the examined sandy cambisol and reduced plant yields, compared to exclusive mineral fertilization. As a consequence, leaching of nitrogen and potassium is increased after application of BKS. These effects are weakened by partitioning the BKS addition over three cultivation years. In a dumped raw soil without humus and a low nutrient status the same BKS applications result in a better plant growth and a reduced seepage water formation since the second year of reclamation. The leaching of nitrogen and potassium is decreased in comparison to exclusive mineral fertilization. Thus, the use of BKS is a promising option for the reclamation of dumped raw soils.

*Keywords:* biochar substrate, reclamation, seepage, nutrient leaching, lysimeter

## Einleitung

Die Lausitzer Region im nordostdeutschen Tiefland ist durch einen hohen Anteil ertragsschwacher, sandiger Agrarstandorte gekennzeichnet, die eine gute Humusversorgung benötigen (HANFF et al. 2008). Eine besondere Herausforderung stellen die Rückgabeflächen des Braunkohlenbergbaus dar (HAUBOLD-ROSAR und GUNSCHERA 2009). Kippböden sind weitgehend frei von rezenter organischer Substanz. Die Humusanreicherung stellt deshalb ein wichtiges Rekultivierungsziel dar.

Seit einigen Jahren wird in zunehmendem Maße der Einsatz von Biokohlen zur Bodenverbesserung und Kohlenstoff-Sequestrierung in Böden wissenschaftlich untersucht (VERHEIJEN et al. 2014). Vorbild sind die als Terra Preta bezeichneten, schwarzerde-artigen Böden des Amazonasgebietes, welche durch die Zufuhr von Holzkohlen und organischen Abfällen entstanden sind (GLASER und BIRK 2012, LEHMANN und JOSEPH 2009). Biokohlen mit hoher Abbaustabilität lassen sich technologisch durch die Pyrolyse von Biomassen herstellen (HOFBAUER et

al. 2009, SCHIMMELPFENNIG und GLASER 2010). Für die Anwendung im Pflanzenbau wird die Erzeugung von Biokohle-Substraten (BKS) empfohlen, die durch Kompostierung und Fermentation der Biokohlen mit leicht umsetzbarer organischer Substanz hergestellt werden können (GLASER und KAMMANN 2013, KRIEGER et al. 2012).

Die bisherigen Forschungen zeigen, dass die Wirkungen von Biokohlegaben auf Böden und Pflanzen abhängig sind von den Charakteristika der Biokohle, des Standortes und der angebauten Kultur (HAUBOLD-ROSAR et al. 2014, LORENZ und LAL 2014). Es fehlt vor allem an mehrjährigen Untersuchungen unter Feldbedingungen in den gemäßigten Breiten. Ertragssteigernde Effekte werden insbesondere einer Anhebung der pH-Werte in sauren Böden und einer Verbesserung der Wasserspeicherung in sandigen Böden zugeschrieben (JEFFERY et al. 2011). In einigen Versuchen wurde eine Verringerung der N-Auswaschung mit dem Sickerwasser nach Biokohlegaben festgestellt (CLOUGH et al. 2013). Als Ursachen werden u.a. eine verstärkte Ammonium-Sorption, Nitrat-Adsorption, N-

<sup>1</sup> Forschungsinstitut für Bergbaufolgelandschaften (FIB), Brauhausweg 2, D-03238 FINSTERWALDE

<sup>2</sup> Freie Universität Berlin, Malteserstraße 74-100, D-12249 BERLIN

\* Ansprechpartner: DI Anne Rademacher, a.rademacher@fib-ev.de



Tabelle 1: Kennwerte der eingesetzten Böden.

Kennwert	Welzow Kipp-Lehmsand		Zinnitz Podsol-Braunerde aus Sand <sup>1)</sup>		
	0-0,1 m	1-3 m	Ap	Bsv	Cv
Bodenart <sup>1)</sup>	SI2	SI3	mSgs	mSgs	gS
Skelett > 2 mm [M.-%]	6,1	3,6	11,0	7,2	9,2
Kf-Wert [cm d <sup>-1</sup> ]	-	82	-	2077	4238
pH (CaCl <sub>2</sub> )	7,6	4,8	5,3	4,6	4,0
C <sub>org</sub> [M.-%]	0,18	< 0,10	1,68	0,30	0,04
N <sub>t</sub> [M.-%]	0,015	0,009	0,120	0,021	< 0,005
C/N-Verhältnis	12	7	14	15	-
T-Wert <sup>2)</sup> [cmolc kg <sup>-1</sup> ]	3,3	6,3	8,0	3,4	0,9
Ca <sup>3)</sup> [mg kg <sup>-1</sup> ]	2230	1200	1220	223	177
Mg <sup>3)</sup> [mg kg <sup>-1</sup> ]	956	2460	443	212	175
K <sup>3)</sup> [mg kg <sup>-1</sup> ]	1140	1698	448	287	323
P <sup>3)</sup> [mg kg <sup>-1</sup> ]	138	303	617	191	283

<sup>1)</sup> Ad-Hoc-AG Boden (2005); <sup>2)</sup> n. DIN 19684 (8); <sup>3)</sup> Königswasserextrakt n. DIN ISO 11466

Tabelle 2: Kennwerte des Biokohlesubstrates.

pH (CaCl <sub>2</sub> )	C <sub>org</sub> [M.-%]	N <sub>t</sub> [M.-%]	C/N	P <sub>DL</sub> [mg kg <sup>-1</sup> ]	K <sub>DL</sub> [mg kg <sup>-1</sup> ]	T-Wert [cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ]
7,9	29,5	1,34	22	1210	8740	46,7

Immobilisierung und N-Einlagerung in den Mikroporen der Biokohle angeführt.

Mit den hier dargestellten Lysimeterversuchen sollen die Effekte von Biokohlesubstrat-Gaben auf die Menge und Qualität der Sickerwässer ertragsschwacher Böden in Nordostdeutschland untersucht werden. Die Versuche sind Bestandteil des Verbundvorhabens „LaTerra“ (<http://laterra-forschung.de>), das die Erarbeitung von Handlungsempfehlungen zum Einsatz von BKS in der Rekultivierung und der landwirtschaftlichen Nutzung ertragsschwacher Standorte zum Ziel hat.

## Material und Methoden

Für den mehrjährig angelegten Lysimeterversuch konnte auf 12 bestehende grundwasserfreie, nicht wägbare Schwerkraft-Großlysimeter (3 m Höhe, ca. 1 m<sup>2</sup> Grund-

fläche) der Lysimeterstation des Forschungsinstituts für Bergbaufolgelandschaften zurückgegriffen werden, deren Sickerwässer ohne Unterdruck aus einer Dränschicht über dem Lysimeterboden gewonnen werden.

Zur Versuchsanlage wurde der obere Profilmeter von sechs Kippboden-Lysimetern durch einen frisch verkippten Rohboden des *LaTerra*-Feldversuchsstandortes „Welzow“ (Kalk führender Kipp-Lehmsand) ersetzt. Weiterhin wurde die 30 cm mächtige Krume aus sechs Lysimetern mit einer Podsol-Braunerde homogenisiert und mit Oberboden der Feldversuchsfläche „Zinnitz“ ergänzt. *Tabelle 1* zeigt einige Kennwerte der Lysimeterböden und -substrate zu Versuchsbeginn im April 2011.

Das Biokohlesubstrat (BKS 15) wurde durch die gemeinsame Kompostierung, Fermentation und Nachrotte einer Mischung aus Grünschnitt, Pyrolysekohle aus Holz (15 Vol.-%), Gärrückstand und Gesteinsmehl hergestellt. Einige Kennwerte des Substrates sind *Tabelle 2* zu entnehmen.

Im April 2011 erfolgte die Einarbeitung von 30 bzw. 90 t TM BKS 15 ha<sup>-1</sup> in die Oberböden von jeweils 2 Lysimetern bis 30 cm Tiefe. Als Referenz dient eine ausschließlich mineralisch gedüngte Variante (*Tabelle 3*). Die mit 30 t BKS

Tabelle 3: Düngung der Versuchsvarianten (Mineraldünger in kg ha<sup>-1</sup> Reinnährstoff).

Kultur	Termin	Düngung der Varianten		
		MIN	30 BKS15 p.a.	90 BKS15
Mais "Subito"	29.04.2011	120 N / 80P / 100 K	30 t ha <sup>-1</sup>	90 t ha <sup>-1</sup>
	20.06.2011		40 N	
Winterroggen "Condukt"	30.09.2011	40 N / 50 P / 130 K	30 t ha <sup>-1</sup>	30 N (zum Stroh)
	29.03.2012		100 N	
	07.05.2012		40 N	
	08.08.2012		30 N (zum Stroh)	
Winterroggen "Condukt"	11.09.2012	40 N / 50 P / 130 K	30 t ha <sup>-1</sup>	30 N (zum Stroh)
	15.04.2013		100 N	
	16.05.2013		40 N	
	05.08.2013		30 N (zum Stroh)	

**Tabelle 4: Pflanzenbauliche Termine.**

Kultur	Saattermin	Saatstärke	Erntetermin
Mais	05/06.05.2011	10 Pflanzen m <sup>2</sup>	01.09.2011
	25.05.2011	Nachsaat einzelner Pflanzen	
Winterroggen	30.09.2011	245 Körner m <sup>2</sup>	12.07.2012
Winterroggen	11.09.2012	245 Körner m <sup>2</sup>	17.07.2013

ha<sup>-1</sup> behandelte Variante erhielt in den beiden Folgejahren erneute BKS-Gaben in gleicher Höhe, so dass insgesamt ebenfalls 90 t BKS ha<sup>-1</sup> appliziert worden sind. Seit der ersten differenzierten Düngergabe im April 2011 werden alle Varianten gleichmäßig mineralisch gedüngt.

Nach Mais im Jahr 2011 folgte der Anbau von Winterroggen in 2011/12 und 2012/13 (Tabelle 4). Das Erntegut wurde u.a. auf seine Hauptnährstoffgehalte untersucht. Die Erfassung der Sickerwässer erfolgt dreimal wöchentlich. Die Wasseranalysen werden an repräsentativen Monatsmischproben durchgeführt. Niederschlagssammler vom Typ Hannoversch Münden dienen der Niederschlagsermittlung. Jeweils im Februar und unmittelbar nach der Ernte wurden Proben aus den Oberböden entnommen.

## Ergebnisse

Durch den Einsatz des BKS wurden die C<sub>org</sub>- und N<sub>t</sub>-Gehalte sowie die Kalium- und Phosphorversorgung der Krume beider Versuchsböden im Vergleich zu den rein mineralisch gedüngten Varianten deutlich erhöht (Tabelle 5). In dem mäßig sauren Boden Zinnitz hat die BKS-Gabe auch zu

einer pH-Anhebung geführt. Nach dreimaliger jährlicher Gabe von 30 t TM BKS liegen die Werte in beiden Böden auf einem etwas höheren Niveau als nach einmaliger Gabe von 90 t ha<sup>-1</sup> zu Beginn des Versuches.

Im ersten Versuchsjahr wurden auf beiden Böden nach dem BKS geringere Maiserträge geerntet als nach reiner Minereraldüngung (Tabelle 6). Dies stimmt überein mit den Ergebnissen zeitgleich durchgeführter Feldversuche und ist auf das in Gefäßversuchen festgestellte geringe N-Mineraldüngeräquivalent des BKS zurückzuführen (WEISS et al. 2014). Auf dem Kipp-Rohboden *Welzow* waren die Maiserträge deutlich geringer als auf dem gewachsenen Boden *Zinnitz*. Dagegen zeigte der Winterroggen in den Jahren 2012 und 2013 auf dem Kippboden ein besseres Wachstum. Nach erneuten Gaben von 30 t BKS15 ha<sup>-1</sup> waren im Vergleich zur Mineraldüngervariante geringe Mehrerträge zu verzeichnen. Im Falle der hohen Anfangs-BKS-Gabe war dies nur im Jahr 2012 auf dem Kippboden gegeben.

Der Verlauf der monatlichen Sickerwassermengen in den Kippboden-Lysimetern zeigt eine starke Versickerung von Dezember bis März und eine typische, transpirationsbedingte Abnahme im Verlauf der Vegetationsperiode - trotz teilweise hoher Niederschläge von Mai bis Juli (Abbildung 1). Das bessere Maiswachstum auf der Mineraldüngervariante in 2011 hat geringere Sickerwassermengen als in den BKS-Varianten zur Folge. In den Jahren 2012 und 2013 kehrt sich das Verhältnis um. Über den gesamten Betrachtungszeitraum sind die Sickerwassersummen der Mineraldüngervariante am höchsten (Abbildung 2). Die etwas höhe-

**Tabelle 5: Chemische Eigenschaften der Oberböden zur Ernte von Mais (2011) und Winterroggen (2013).**

Termin	Boden	Variante	pH <sup>1)</sup> (CaCl <sub>2</sub> )	C <sub>org</sub> <sup>2)</sup>	N <sub>t</sub> <sup>3)</sup> [%]	C/N	K <sub>DL</sub> <sup>4)</sup> [mg kg <sup>-1</sup> ]	P <sub>DL</sub> <sup>4)</sup> [mg kg <sup>-1</sup> ]
9/2011	<i>Welzow</i>	MIN	7,5	0,19	0,014	14	9	20
		30 BKS15 p.a.	7,5	0,28	0,018	16	23	23
		90 BKS15	7,5	0,50	0,032	16	42	32
	<i>Zinnitz</i>	MIN	5,3	1,54	0,110	14	7	98
		30 BKS15 p.a.	5,6	1,74	0,115	15	53	112
		90 BKS15	6,1	2,20	0,135	16	187	151
7/2013	<i>Welzow</i>	MIN	7,5	0,21	0,016	14	41	29
		30 BKS15 p.a.	7,5	0,64	0,032	20	95	41
		90 BKS15	7,5	0,52	0,032	17	93	42
	<i>Zinnitz</i>	MIN	5,6	1,39	0,096	15	45	107
		30 BKS15 p.a.	6,0	2,16	0,125	17	219	151
		90 BKS15	5,9	1,90	0,120	16	105	126

<sup>1)</sup> DIN ISO 10390; <sup>2)</sup> DIN ISO 10694; <sup>3)</sup> DIN ISO 13878; <sup>4)</sup> n. VDLUFA 1991 Bd. I A 6.2.1.2

**Tabelle 6: Erträge der angebauten Kulturen.**

Boden	Variante	Ertrag [dt ha <sup>-1</sup> ] (relativ [%])				
		Mais 2011 <sup>1)</sup>	Winterroggen 2012		Winterroggen 2013	
			Korn <sup>2)</sup>	Stroh <sup>1)</sup>	Korn <sup>2)</sup>	Stroh <sup>1)</sup>
<i>Welzow</i>	MIN	153 (100)	48 (100)	54 (100)	61 (100)	61 (100)
	30 BKS15 p.a.	103 (67)	51 (106)	53 (100)	66 (108)	62 (102)
	90 BKS15	114 (74)	54 (114)	57 (107)	57 (93)	52 (86)
<i>Zinnitz</i>	MIN	187 (100)	42 (100)	43 (100)	53 (100)	59 (100)
	30 BKS15 p.a.	170 (91)	40 (95)	44 (103)	53 (101)	63 (107)
	90 BKS15	177 (95)	30 (72)	36 (84)	52 (98)	47 (81)

<sup>1)</sup> TM<sub>atro</sub>; <sup>2)</sup> 86 % TS

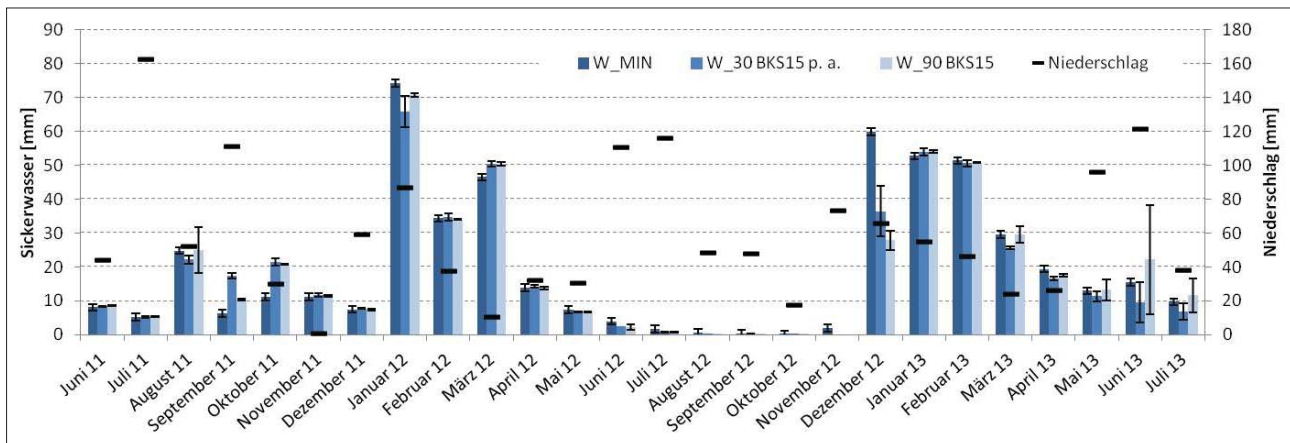


Abbildung 1: Monatliche Niederschlags- und Sickerwassermengen der Düngervarianten für den Boden Welzow (Arith. Mittel  $\pm$  Stdbw; n=2).

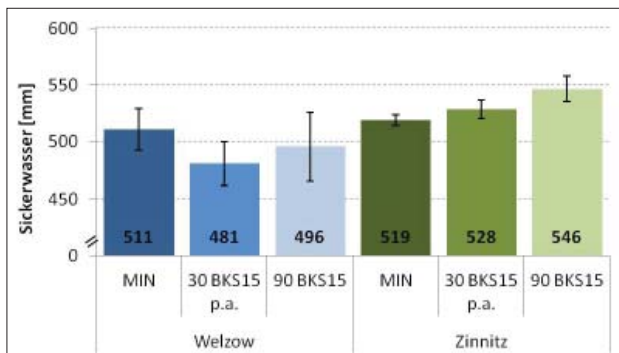


Abbildung 2: Sickerwassersummen von 6/2011 bis 7/2013 (Arith. Mittel  $\pm$  Stdbw; n=2).

ren Sickerwassermengen des gewachsenen Bodens *Zinnitz* zeigen einen sehr ähnlichen Verlauf. Allerdings weisen bei diesem Boden die BKS-Varianten aufgrund des reduzierten Pflanzenwachstums über die gesamte Messperiode geringfügig höhere Sickerwasserraten auf als die rein mineralisch gedüngte Referenzvariante (s. auch *Abbildung 2*).

Die Nitrat-Stickstoff-Gehalte der Sickerwässer liegen für den Boden *Welzow* über den gesamten Versuchszeitraum mit Ausnahme von Okt./Nov. 2012 unter  $6 \text{ mg l}^{-1}$  (*Abbildung 3 oben*). Bis April 2013 sind die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte der BKS-Varianten geringer bzw. auf dem Niveau der mineralischen Referenz. Insgesamt bleiben die  $\text{N}_{\text{min}}$ -Austräge ( $\text{NO}_3^{2-} + \text{NH}_4^+$ ) aller Varianten in den 26 Monaten unter  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  (*Abbildung 4*). Die Applikation von 90 t BKS mit ca.  $1.200 \text{ kg Gesamt-N ha}^{-1}$  führte somit nicht zu einer verstärkten N-Auswaschung.

Der gewachsene Boden *Zinnitz* zeigt eine andere Reaktion. Die  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte haben ein deutlich höheres Niveau mit Werten von 5 bis  $45 \text{ mg l}^{-1}$  (*Abbildung 3 unten*). Das ist zum einen auf die deutlich höhere Wasserleitfähigkeit zurückzuführen (s. Kf-Werte in *Tabelle 1*). Zum anderen findet in dem gewachsenen, humosen und gut durchlüfteten Oberboden eine stärkere Umsetzung und Mineralisierung der mit dem BKS zugeführten organischen Primärsbstanzten statt als in dem jungen, humusarmen, bindigeren und mikrobiell weniger aktiven Kippboden. Die geringeren Erträge auf

dem gewachsenen Boden *Zinnitz* in den Jahren 2012 und 2013 haben zudem geringere Nährstoffentzüge zur Folge. Das schlechtere Pflanzenwachstum des Winterroggen auf den BKS-Varianten in diesen Jahren ist auch als Ursache für die höheren  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte und die insgesamt höheren  $\text{N}_{\text{min}}$ -Austräge im Vergleich zu der Mineraldüngervariante zu sehen. So steigt der für den Zeitraum von 26 Monaten summierte  $\text{N}_{\text{min}}$ -Austrag bei der 90 t BKS-Variante auf  $145 \text{ kg ha}^{-1}$  (*Abbildung 4*).

Auch die über den bisherigen Versuchszeitraum aufsummierten Kaliumausträge aus dem gewachsenen Boden *Zinnitz* sind nach dem BKS-Einsatz größer als nach reiner Mineraldüngung (*Abbildung 4*). Dies ist sowohl auf höhere Sickerwassermengen als auch erhöhte K-Konzentrationen in den Sickerwässern der BKS-Varianten erklärbar. Die Differenzen sind allerdings mit 5 bzw.  $15 \text{ kg ha}^{-1}$  als gering einzustufen. Mit 90 t BKS wurden etwa  $900 \text{ kg K ha}^{-1}$  in die Oberböden eingearbeitet. In dem Kippboden *Welzow* hat dies nicht zu einer Steigerung der K-Austräge geführt. Vielmehr nehmen die K-Verluste mit dem Sickerwasser nach der BKS-Applikation geringfügig ab.

## Schlussfolgerungen

Der Einsatz von 90 t BKS  $\text{ha}^{-1}$  erzeugt ein Nährstoff-Überangebot in der untersuchten Podsol-Braunerde aus Sand. Die Pflanzenerträge sind geringer als nach reiner Mineraldüngung. Nach der BKS-Gabe kommt es deshalb aufgrund der verringerten Transpiration und der hohen Wasserleitfähigkeit des Bodens zu einer verstärkten N- und K-Auswaschung. Diese Effekte werden abgeschwächt durch die Staffelung der BKS-Gabe über drei Anbaujahre. In dem humus- und nährstoffarmen Kippboden führt die gleiche BKS-Gabe von 90 t  $\text{ha}^{-1}$  zu einer Verbesserung des Pflanzenwachstums und einer Verringerung der Sickerwasserbildung im zweiten Rekultivierungsjahr. Die N- und K-Austräge werden reduziert. Durch die Verteilung der BKS-Gabe auf drei Anbaujahre werden auch die Erträge des dritten Rekultivierungsjahres verbessert und die N- und K-Frachten verringert. Für die Rekultivierung von Kippböden stellt der Einsatz von Biokohlesubstraten somit eine vielversprechende Option dar.

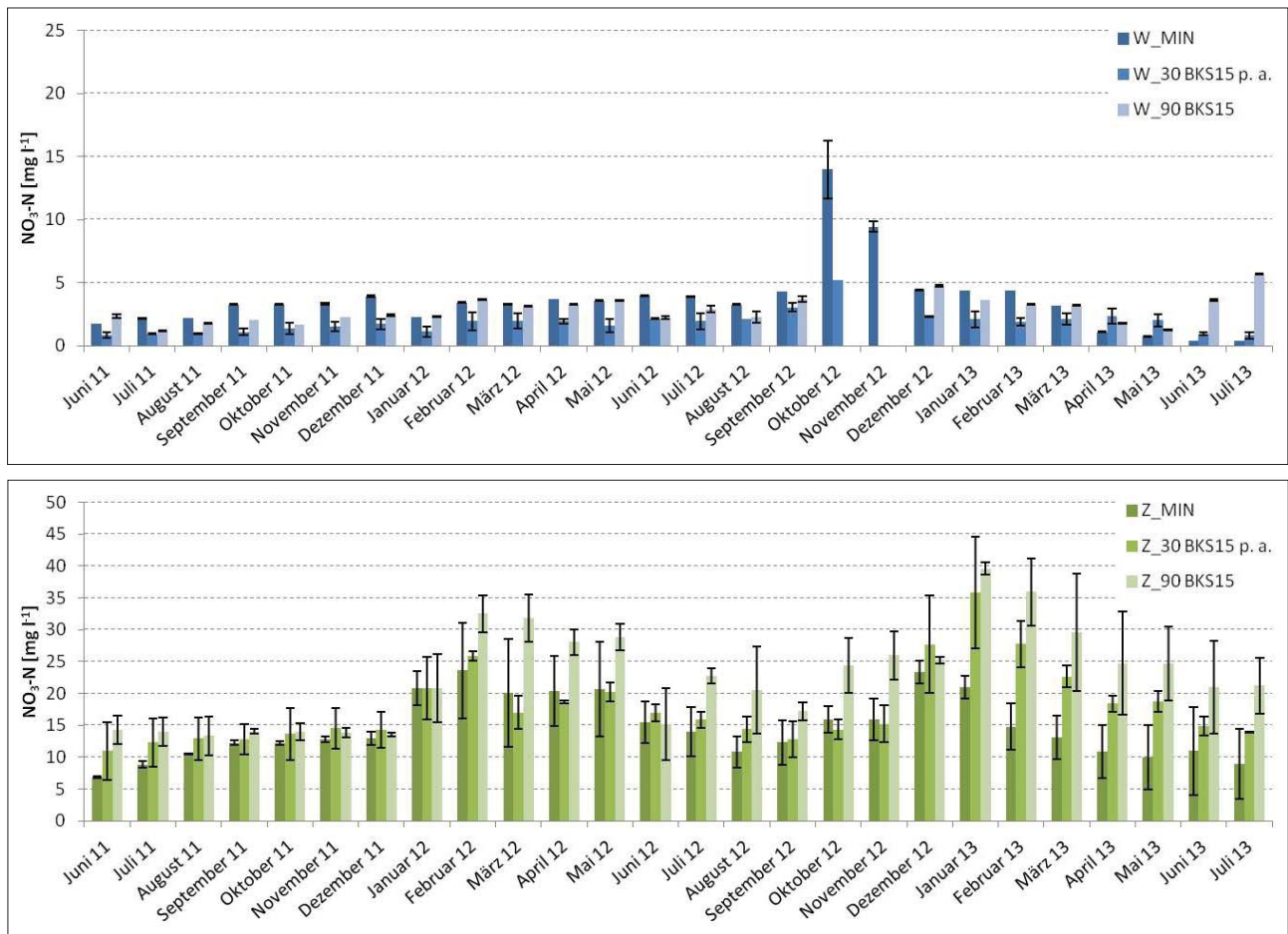


Abbildung 3: Monatliche  $\text{NO}_3\text{-N}$ -Gehalte im Sickerwasser der Düngewarienten für den Boden Welzow (oben) und Zinnitz (unten) (Arith. Mittel  $\pm$  Stdbw;  $n=2$ ).

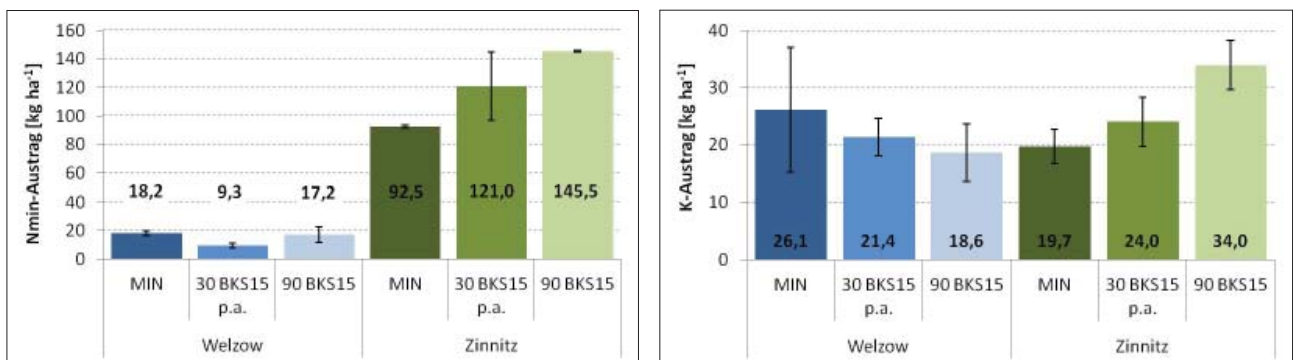


Abbildung 4: Summen der  $\text{N}_{\text{min}}$ - und  $\text{K}^+$ -Austräge mit dem Sickerwasser von 6/2011 bis 7/2013 (Arith. Mittel  $\pm$  Stdbw;  $n=2$ ).

## Literatur

- CLOUGH, T.J., L.M. CONDRON, C. KAMMANN and C. MÜLLER, 2013: A Review of Biochar and Soil Nitrogen Dynamics. *Agronomy* 3, 275-293.
- GLASER, B. and J. BIRK, 2012: State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82, 39-51.
- GLASER, B. and C. KAMMANN, 2013: Wechselwirkungen von Kompost und Pflanzenkohle: Möglichkeiten und Grenzen von Terra Preta-Ähnlichen Produkten. In: Fricke, K. et al. (Hrsg.): *Abfallwirtschaft*

- meets Biochar - Perspektiven für den Klimaschutz? Orbit e.V., Weimar, 135-148.
- HANFF, H., G. NEUBERT und H. BRUDEL, 2008: Datensammlung für die Betriebsplanung und die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg - Ackerbau / Grünlandwirtschaft / Tierproduktion. Potsdam. (Hrsg.: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg).
- HAUBOLD-ROSAR, M. and G. GUNSCHERA, 2009: Düngempfehlungen für die landwirtschaftliche Rekultivierung von Kippenflächen. Schriftenreihe des Forschungsinstituts für Bergbaufolgelandschaften e.V., Band 1.

- HAUBOLD-ROSAR, M., J. KERN und J. REINHOLD, 2014: Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Forschungsbericht im Auftrag des UBA, FKZ 3712 71 222.
- HOFBAUER, H., M. KALTSCHMITT und T. NUSSBAUMER, 2009: Thermo-chemische Umwandlungsprozesse. In: Kaltschmitt, M. et al. (Hrsg.), Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer, Heidelberg, 375-407.
- JEFFERY, S., F.G.A. VERHEIJEN, M. van der VELDE and A.C. BASTOS, 2011: A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144, 175-187.
- KRIEGER, A.E., J. BÖTTCHER und M. DOTTERWEICH, 2011: Großtechnische Erzeugung und Nutzung von Terra Preta. In: Fricke, K. et al. (Hrsg.), Biokohle - Klimaretter oder Mogelpackung? - Risiken und Chancen für die Abfallwirtschaft? Orbit e.V., Weimar, 135-139.
- LEHMANN, J. and S. JOSEPH, 2009: Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan, London.
- LORENZ, K. and R. LAL, 2014: Biochar application to soil for climate change mitigation by soil organic carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 117, 651-670.
- SCHIMMELPFENNIG, S. and B. GLASER, 2012: One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars. *Journal of Environmental Quality*, 41, 1001-1013.
- VERHEIJEN, F.G.A., E.R. GRABER, N. AMELOOT, A.C. BASTOS, S. SOHI and H. KNICKER, 2014: Biochars in soils: new insights and emerging research needs. *European Journal of Soil Science*, 65, 22-27.
- WEISS, U., A. RADEMACHER and M. HAUBOLD-ROSAR, 2014: Effects of biochar substrates in agriculture and reclamation on poor sandy soils of Northeastern Germany - results of field and pot experiments. 19<sup>th</sup> International Conference for Renewable Resources and Plant Biotechnology NAROSSA, June 16-17, 2014, Poznan, Poland, Proceedings No. 2.1.

## Danksagung

Die Untersuchungen werden im Rahmen des F/E- Verbundvorhabens „LaTerra“ durchgeführt und durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert (FKZ: 033L021B).