

Dr. M. Mokry, Th. Aichele, J. Beyer

## Einsatz von „Biokohle“ in der Landwirtschaft

### Zwischenergebnisse eines BLE-Drittmittelprojektes

Die Ertragsleistung eines Bodens wird maßgeblich durch seine Bodenfruchtbarkeit definiert. Durch die Wechselwirkungen von Klima, Bodeneigenschaften und Bewirtschaftung werden die Voraussetzungen hierfür und somit für das Wachstum einer Pflanze bestimmt.

Die Bodenbewirtschaftung, wie sie heute häufig Anwendung findet, ist nicht immer vorteilhaft für die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften eines Bodens. Zudem werden durch die ständig wachsende Weltbevölkerung immer mehr Nahrungs- und Futtermittel gebraucht, während gleichzeitig die landwirtschaftlich nutzbare Fläche kontinuierlich abnimmt. Somit müssen die Bewirtschaftungsmethoden optimiert werden, um die Bodenfruchtbarkeit möglichst nachhaltig zu sichern oder – wenn nötig – zu verbessern.

So weckte beispielsweise die Wiederentdeckung der „Terra Preta“ im Amazonasbecken Brasiliens in den letzten Jahrzehnten ein enormes wissenschaftliches Interesse für die Nutzung von Biokohle zur Bodenverbesserung. Forscher entdeckten dort tiefgründige, sehr fruchtbare schwarzerdeartige Böden durchsetzt mit Tonscherben aus der vorkolumbianischen Zeit. Schätzungen zufolge beläuft sich die Ausdehnung der sogenannten „Terra Preta“ auf 10 % des Amazonasbeckens (MANN, 2002). „Terra Preta“- Böden haben sich anthropogen aus anorganischen und organischen Komponenten entwickelt. Man fand heraus, dass sich diese tiefgründige Humusschicht aus der Vermischung von Feuerstellenresten wie Asche und Kohle mit Essensresten wie Knochen und Fischgräten sowie Exkrementen, Urin und Biomasseabfällen entwickelt hat. Diese Bestandteile wurden mikrobiell metabolisiert und durch Humifikation im Boden stabilisiert. Noch ist unklar, ob die Bildung der „Terra Preta“ beabsichtigt oder unbeabsichtigt war. Die Landwirte vor Ort berichten von höheren Erträgen, bei denen sich die Kohleanteile als Schlüsselfaktor erweisen, die sie aufgrund ihrer Stabilität und der Fähigkeit, Nährstoffe sowie Wasser zu speichern, einnehmen (GLASER et al., 2012).

Dieses Wissen möchte sich die Wissenschaft zunutze machen. Durch die Zufuhr von auf technischem Wege hergestellter Biokohle in landwirtschaftlich genutzten Böden könnte einerseits Kohlenstoff langfristig gespeichert (= C-Sequestrierung), andererseits könnten nährstoffarme oder mit Schadstoffen belastete Böden nachhaltig aufgewertet werden (BLACKWELL et al., 2009).

Zur bioenergetischen Nutzung von Restbiomasse werden derzeit zwei Verkohlungsverfahren - das Pyrolyse- und das HTC-Verfahren (= hydrothermale Karbonisierung) - als sehr effiziente und emissionsarme Verwertungsschienen genutzt. Die Option, das Umsetzungsprodukt „Biokohle“ als Wertstoff für landwirtschaftliche Böden anzuwenden, könnte vor dem Hintergrund der effizienten Verarbeitung schlecht verwertbarer, unbedenklicher Restbiomassen zu neuen Wertschöpfungspotentialen führen.

### Material und Methoden

#### Pyrolyseverfahren

Durch Variation von Temperatur und Prozessdauer, aber auch der Aufheizrate werden während des Pyrolyse-Prozesses die Mengenanteile an flüssigen, gasförmigen oder festen Komponenten im Endprodukt beeinflusst. Die Pyrolyse ist ein in der Industrie häufig benutztes Verfahren, um beispielsweise Bio-Öl, Pyrolysegase oder Biokohle zu gewinnen. Bei der Kohleherstellung haben sich ein langsames Aufheizen, Temperaturen zwischen 400 °C bis 800 °C und eine Verweildauer über mehrere Stunden bewährt. Je höher die Temperatur, desto höher ist der Kohlenstoffgehalt und desto abbaustabiler wird die Kohle (RÖNSCH, 2011). Für die Pyrolyse eignen sich besonders Ausgangssubstrate mit einem Trockensubstanzgehalt größer 50 % (Holz sowie trockene Reststoffe

Parameter	Dimension	Forchheim	Freiburg
Bodenart		IS	uL
pH		5,4	7,3
Humus	(% TM)	2,2	1,7
Gesamt-N		0,1	0,1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	(mg/100 g B.)	16	20
K <sub>2</sub> O		12	17
Mg		5	7
Bor	(mg/kg TM)	0,14	0,24
Mangan		73	14
Zink		4	3
Kuper		1,6	1,7

Tabelle 1  
Kenndaten der  
Versuchsstandorte

aus der Landwirtschaft wie z. B. Stroh), da ansonsten das Material vorher energieaufwändig getrocknet werden müsste.

### HTC-Verfahren

Die hydrothermale Carbonisierung, kurz HTC genannt, ist ein Nassverfahren, mit dem die Kohle bei Temperaturen von ca. 200 °C und einem Druck von etwa 20 bar hergestellt wird. Während die Biomasse für ungefähr 6 Stunden im Reaktor unter Zugabe von Säuren und Salzen behandelt wird, wird eine Vielzahl von Prozessen wie beispielsweise Hydrolyse, Dehydratisierung, Decarboxylierung sowie Agglomeration und Polymerisierung in Gang gesetzt. Hierdurch entstehen verschiedenste Zwischenprodukte wie Zucker, Furfurale oder organische Säuren (BUTTMANN, 2011).

### Eigenschaften der Biokohletypen

Da mit dem HTC-Verfahren eine Vielzahl von HTC-Kohlen mit unterschiedlichsten Eigenschaften hergestellt werden kann, ist im Vergleich zur pyrogenen Kohle bisher nur wenig über ihre Auswirkungen im Boden bekannt. Während es

Tabelle 2  
Kenndaten der organischen  
Dünger

org. Dünger bzw. Biokohlen	TS	pH-Wert	N	NH <sub>4</sub>	P	K	Mg
	(% FM)	(% TM)					
Kompost	54,8	7,3	0,5	-	0,39	0,88	0,59
Gärrest fest	18,5	9,2	2,8	1,54	0,82	3,60	0,29
HTC-Kohle	33,9	4,7	3,8	0,18	1,21	0,02	0,23
Pyrolyse-Kohle	67,0	10,5	0,6	-	3,05	0,78	0,51

beim HTC-Prozess zu einer vollständigen strukturellen Auflösung des verwendeten Ausgangsmaterials mit anschließender Polymerisation der Abbauprodukte kommt, bleibt bei der Pyrolyse die Struktur des Ausgangsmaterials weitestgehend erhalten. Daher ist die pyrogene Biokohle äußerst porös und besitzt eine enorme spezifische Oberfläche von teilweise über 300 m<sup>2</sup> pro Gramm (SCHMIDT, 2011). Durch den hohen Porengehalt können sowohl die Wasser-, als auch die Luftkapazität eines Bodens erheblich verbessert werden. Die Poren stellen nicht nur einen möglichen Wurzeldurchgang dar, sondern bieten auch Mikroorganismen ein nährstoffreiches Habitat an, das vor „Feinden“ geschützt ist. Aufgrund der großen spezifischen Oberfläche und der damit einhergehenden Adsorptionsleistung kann die pyrogene Biokohle zum einen als Trägermittel für Nährstoffe und zum anderen als Puffer gegen die Auswaschung von organischen Schadstoffen und Schwermetallen ins Grundwasser gesehen werden. Diese Eigenschaft kann zwar in nährstoffarmen Böden erhebliche Vorteile bringen, jedoch besteht auch die Gefahr, dass Nährstoffe - mit der Folge möglicher Ertragseinbußen – zunächst immobilisiert werden (SCHMIDT, 2011). Obwohl bereits zahlreiche Untersuchungen zu den physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften verschiedener Kohlen durchgeführt wurden, fehlt immer noch ein präziser Leitfaden für den Einsatz von Biokohle in der Landwirtschaft.

### Feldversuche zum Einsatz von „Biokohle“

Das Landwirtschaftliche Technologiezentrum (LTZ) Augustenberg beschäftigt sich aktuell mit dem Einsatz von Biokohle in der Landwirtschaft. Das von der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) über die landwirtschaftliche Rentenbank geförderte sog. „CarboSolum“-Projekt untersucht dabei u.a. die physikalischen, chemischen und biologischen Auswirkungen zweier auf unterschiedliche Weise karbonisierter Restbiomassen (Landschaftspflegematerial und

Variante (VG)	Behandlung	Aufwandmenge
1	ohne jegliche Düngung	
2	Kompost	40 t FM/ha
3	Gärrest fest	20 t FM/ha
4	mineralische Düngung	N: kulturspezifisch; P: Abfuhr; K: kulturspezifisch
5	HTC-Kohle (Biertreber)	20 t TM/ha
6	HTC-Kohle + Kompost	20 t TM/ha + 40 t FM/ha
7	HTC-Kohle + GR fest	20 t TM/ha + 20 t FM/ha
8	Pyrolyse-Kohle (Grünmasse)	20 t TM/ha
9	Pyrolyse-Kohle + Kompost	20 t TM/ha + 40 t FM/ha
10	Pyrolyse-Kohle + GR fest	20 t TM/ha + 20 t FM/ha

Tabelle 3  
Versuchsplan

Biertreber) auf den Boden und die Pflanzenproduktion über drei Versuchsjahre. Ziel der hierfür angelegten Feldversuche ist es, Aussagen über Mindeststandards der gewählten Biokohlen zu treffen. Für die Feldversuche wurden zwei Standorte mit verschiedenen Bodeneigenschaften ausgewählt (Tab. 1).

Im folgenden Beitrag wird der Einfluss von Biokohle aus dem HTC- bzw. Pyrolyseverfahren auf die Ertragsbildung und Nährstoffaufnahme von Körnermais und Winterweizen an den Standorten Forchheim - Raum Karlsruhe – und March – Raum Freiburg i. Br. - über die bisherige Versuchsdauer von zwei Jahren beschrieben (Tab. 1 bis 4). Besonders interessiert in diesem Zusammenhang, ob Ertragsunterschiede zwischen den Standorten in Folge unterschiedlicher Standorteigenschaften (Nährstoff- und Wasserhaushalt!) durch eine Zugabe von Biokohle ausgeglichen werden können.

Bei den Feldversuchen (Tab. 3) handelt es sich um zweifaktorielle Blockversuche. Hierbei ist Ver-

suchsglied (VG) 1 als Nullvariante und somit ohne jegliche Düngung während der gesamten Versuchsdauer angelegt. Unter Beachtung der pflanzenspezifischen P-Abfuhr wurden die organischen Vergleichsdünger „Kompost“ und „Gärreste fest“ (= Feststoffanteil nach Separierung der flüssigen Gärreste) nach „guter fachlicher Praxis“ ausgebracht. Diese sowie eine Variante mit ausschließlicher mineralischer Düngung (VG 4) - jeweils ohne Biokohle-Zusatz - dienen dazu, den Einfluss einer Biokohle-Zugabe (VG 5 bis 10) beurteilen zu können. Hierbei steht eine mögliche Düngewirkung oder ein möglicher Einfluss der Biokohlen auf die Bodenfruchtbarkeit (Nährstoff-/Wasserhaushalt, biologische Kenngrößen der Böden...) im Vordergrund.

Da es bislang keine gesetzlichen Regelungen für den Einsatz von Biokohle in landwirtschaftlich genutzten Böden gibt, orientierte man sich bei den Ausbringungsmengen von 20 t TM ha<sup>-1</sup> innerhalb von drei Jahren an der Bioabfallverordnung (Kompostdüngung).

Tabelle 4  
Nährstofffrachten [kg/ha] – zu Versuchsbeginn ausgebracht

Varianten	Nährstofffrachten				
	N	lösl. N	P	K	Mg
	kg ha <sup>-1</sup>				
Kompost	110	5	85	193	129
Gärrest (fest)	104	52	30	266	11
Gärrest (flüssig)	60	36	14	82	82
HTC-Kohle	760	12	242	4	46
HTC + Kompost	870	18	327	197	175
HTC + Gärrest (fest)	864	64	272	270	57
Pyrolyse-Kohle	120	-	610	156	102
Pyrolyse + Kompost	230	5	695	349	231
Pyrolyse + Gärrest (fest)	224	52	640	422	113

\* im 2. Versuchsjahr auf VG 3 ausgebracht

Auf der Basis einer standort- und kulturspezifischen Düngedarfsermittlung wurden die Versuchsglieder jährlich zusätzlich mit mineralischem N gedüngt.

In Tabelle 2 sind die Nährstoffgehalte der ausgebrachten Substrate aufgeführt. Zunächst wird davon ausgegangen, dass der Ertrag maßgeblich von den tatsächlich ausgebrachten Nährstoffen (Tab. 4) beeinflusst wird, jedoch sind auch Parameter wie pH-Wert und physikalische Beschaffenheit des jeweiligen Düngers ausschlaggebend für die Bindungsform und Verfügbarkeit der Nährstoffe und somit für die Ertragsbildung.

Da die Biokohlen aus verschiedenen Ausgangssubstraten (Pyrolyse-Kohle aus Landschaftspflegematerial – HTC-Kohle aus Biotreber) hergestellt wurden, sind deren Inhaltsstoffe und physikalischen Eigenschaften ebenfalls z.T. sehr unterschiedlich.

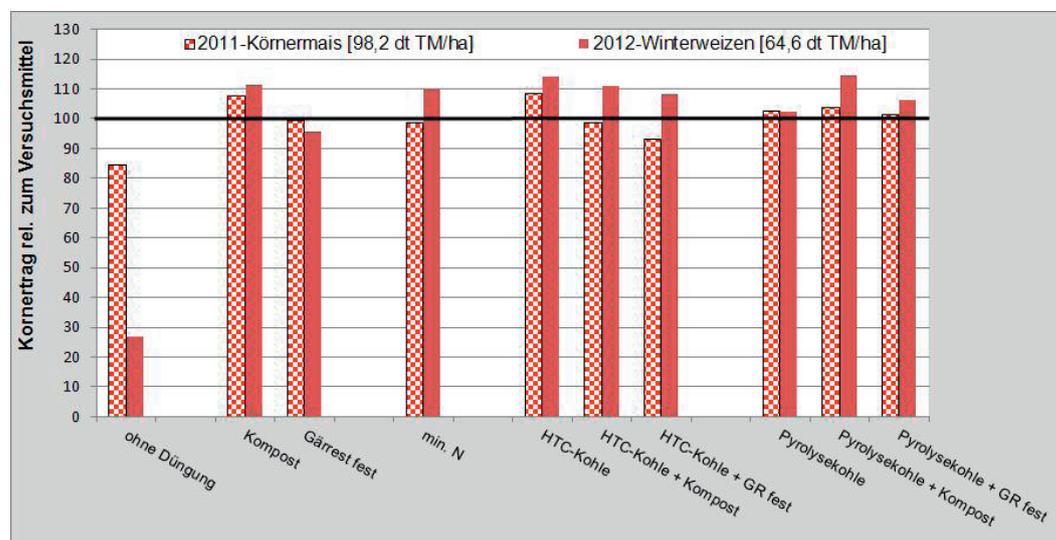
Besonders hervorzuheben sind hierbei die deutlichen Unterschiede im TS-Gehalt. Dies beruht darauf, dass bei der Bildung der pyrogenen Kohle unter sehr hohen Temperaturen Wasser ausgetrieben, während beim HTC-Verfahren Wasser zugeetzt (= Nassverfahren) wird. Auch der pH-Wert der beiden Kohlen unterscheidet sich wesentlich. Dies kann in Abhängigkeit von der Ausbringungsmenge einen starken Einfluss auf die mikrobielle Besiedlung der Kohle und dadurch u.a. auf die N-Verfügbarkeit ausüben. Die Nährstoffgehalte der im Versuch verwendeten Vergleichssubstrate „Kompost“ und „Gärreste fest“ variieren in Abhängigkeit vom jeweiligen Ausgangsmaterial und Herstellungsverfahren deutlich. In Folge anaero-

ber Vergärung im Biogasreaktor weisen beispielsweise die Gärreste fest einen hohen Gehalt an verfügbarem  $\text{NH}_4\text{-N}$  auf, der beim Kompost und den Biokohlen vernachlässigbar klein ist. Dagegen ist der Stickstoff im Kompost vorwiegend in organischer Form gebunden, weshalb dieser erst nach einer längeren Verweilzeit verfügbar wird. Im Vergleich zum Landschaftspflegematerial, welches vorwiegend aus Cellulose, Hemicellulose und etwas Lignin besteht, enthalten Biotreber einen hohen Anteil an Proteinen. Deshalb weist die HTC-Kohle höhere N-Gehalte als die pyrogene Kohle auf. Die Kaliumgehalte sind bei der HTC-Kohle im Vergleich zu den anderen Substraten sehr gering, da einerseits der Kaliumgehalt von Getreidekörnern niedrig ist und andererseits während des HTC-Prozesses ein Großteil des löslichen Kaliums in das sog. Prozesswasser übergeht. Besonders hervorzuheben sind die hohen P-Frachten bei einer Düngung insbesondere mit Pyrolysekohle.

### Versuchsergebnisse

Abbildungen 1 und 2 bzw. 3 und 4 zeigen die **Körnermais- bzw. Winterweizenerträge** und die korrespondierenden **Rohproteingehalte** im Mittel von vier Wiederholungen. Statistisch gesehen gibt es mit Ausnahme der ungedüngten Varianten weder Tendenzen noch Unterschiede zwischen den gedüngten Versuchsgliedern in beiden Jahren. Das Ertragsbild variiert auf dem Standort „Forchheim“ deutlicher als in „March“. Hier sind die Körnerträge von Körnermais in beiden Versuchsjahren nahezu identisch - selbst auf den Parzellen „ohne Düngung“ -.

Abbildung 1  
Körnerträge [rel. zum Versuchsmittel] am Standort „Forchheim“



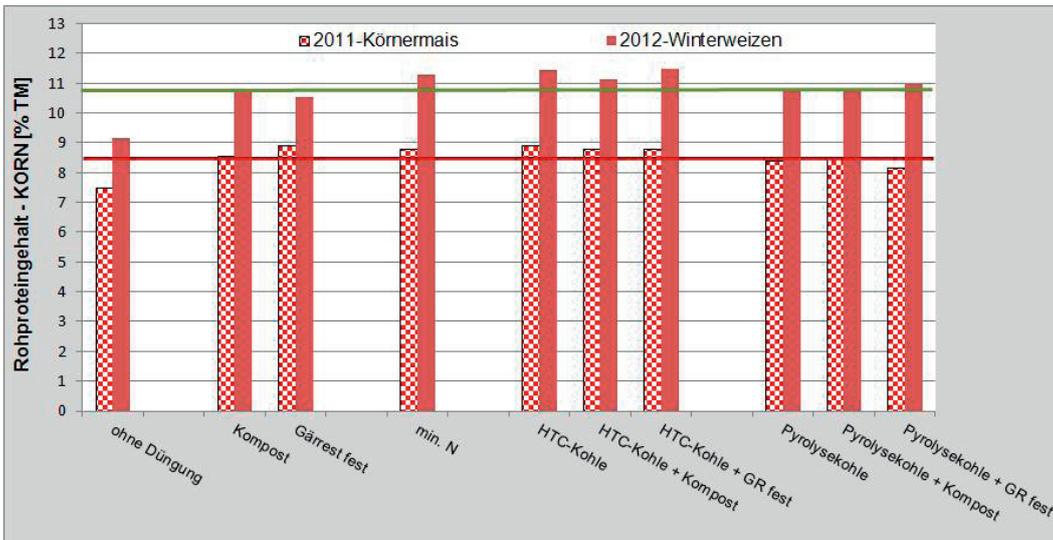


Abbildung 2  
Rohproteingehalte [% TM bzw. im Mittel] am Standort „Forchheim“

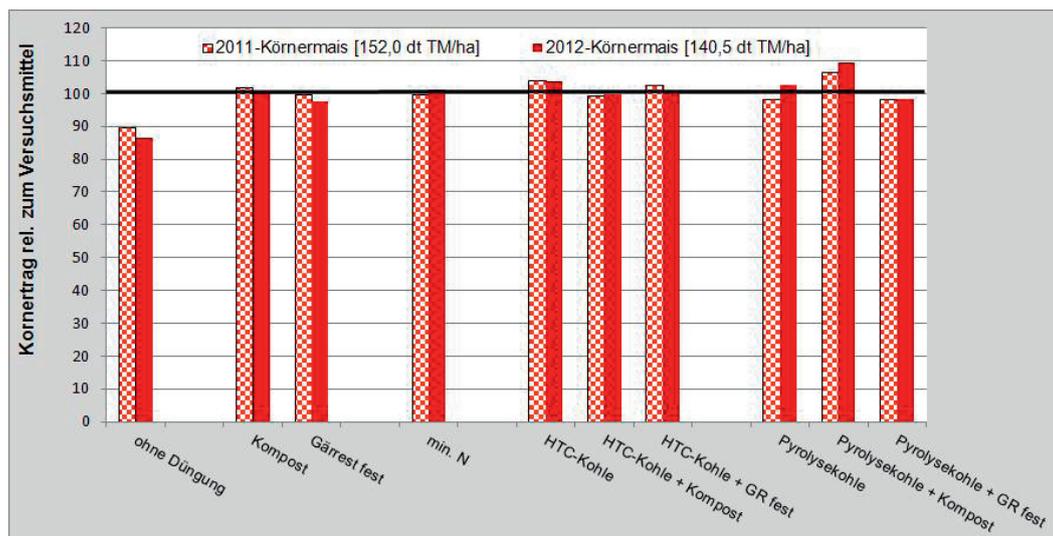


Abbildung 3  
Körnerträge [rel. zum Versuchsmittel] am Standort „March“

Beim Proteingehalt zeigen sich jedoch tendenziell niedrigere Gehalte im 2. Körnermaisjahr am Standort „March“. Dies könnte jedoch auch die Folge ungünstigerer Witterungsbedingungen – insbesondere während der Abreife - im Vergleich zum Versuchsjahr 2011 gewesen sein. Am Standort „Forchheim“ lassen sich weder bei Körnermais noch bei Winterweizen signifikante Unterschiede im Proteingehalt der Prüfglieder feststellen, obwohl die Ertragsschwankungen – insbesondere im Körnermaisjahr – deutlicher ausgefallen waren als am Standort „March“. Diese Standortunterschiede können durchaus in den teils stärker variierenden Bodeneigenschaften – insbesondere im Humus- und Wasserhaushalt – begründet sein. Daher reagieren am Standort „Forchheim“ die Erträge in beiden Versuchsjah-

ren nach einer Kompostzufuhr – sei es ohne oder in Kombination mit Biokohle – positiver als eine ergänzende Gabe mit Gärrest fest.

Die **Mineralstoffgehalte** P, K und Mg der Ernteproben zeigen keine Unterschiede unabhängig vom Versuchsjahr, vom Standort oder von der jeweiligen Kultur.

Die **N<sub>min</sub>-Ergebnisse** (Abb. 5 und 6) der mineralisch sowie ausschließlich mit HTC- bzw. Pyrolysekohle gedüngten Varianten sind nach der Ernte des 1. Versuchsjahres am Standort „Forchheim“ leicht erhöht. Alle übrigen bisher gemessenen Werte sind unspektakulär und lassen sich nicht zwingend der Versuchsdüngung zuordnen.

Abbildung 4  
Rohproteingehalte [% TM  
bzw. im Mittel] am Standort  
„March“

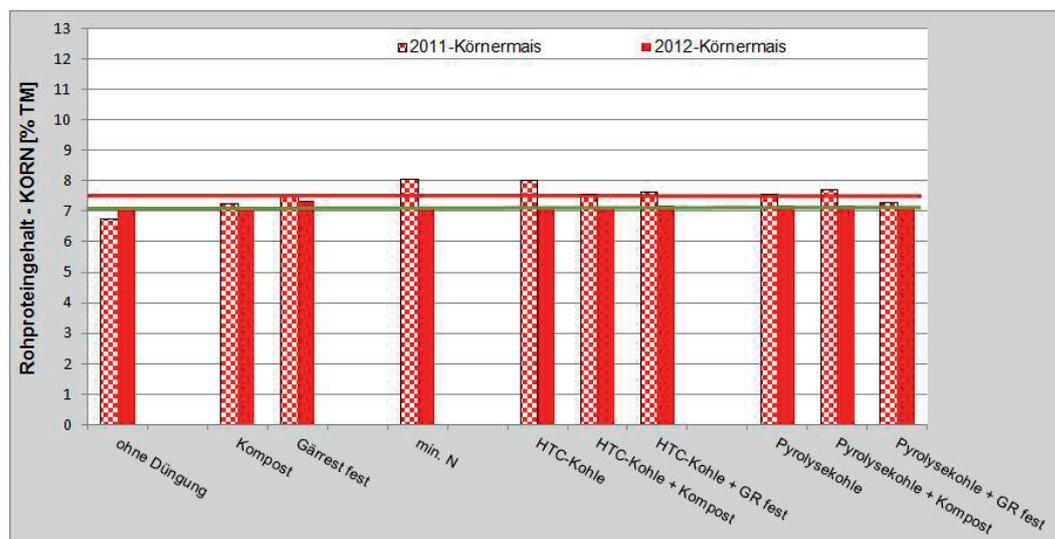


Abbildung 5  
Nmin-Gehalte [kg Nitrat-N/ha  
von 0 bis 90 cm] am Standort  
„Forchheim“

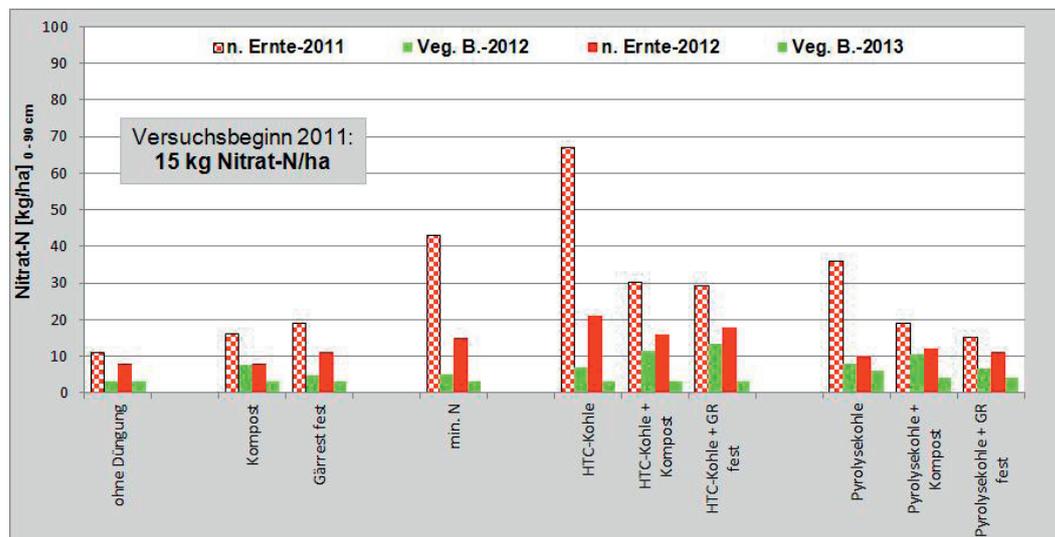
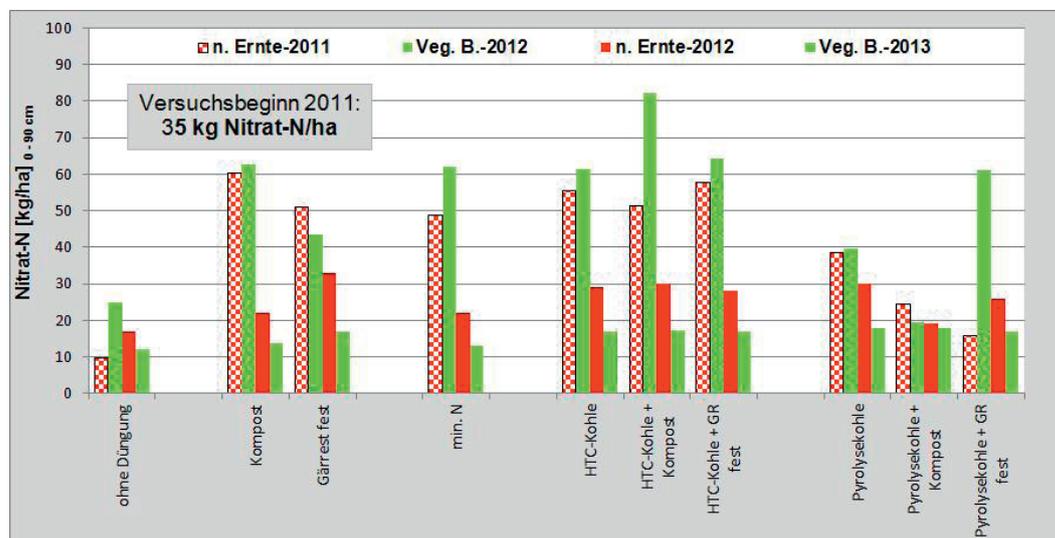


Abbildung 6  
Nmin-Gehalte [kg Nitrat-N/ha  
von 0 bis 90 cm] am Standort  
„March“



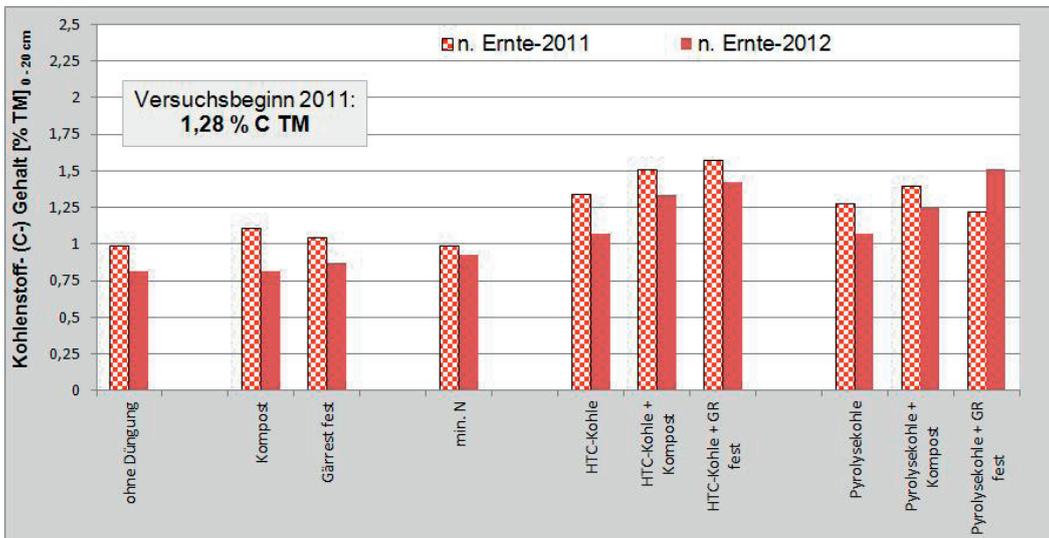


Abbildung 7 Kohlenstoff- (C-) Gehalte [% TM von 0 bis 20 cm] am Standort „Forchheim“

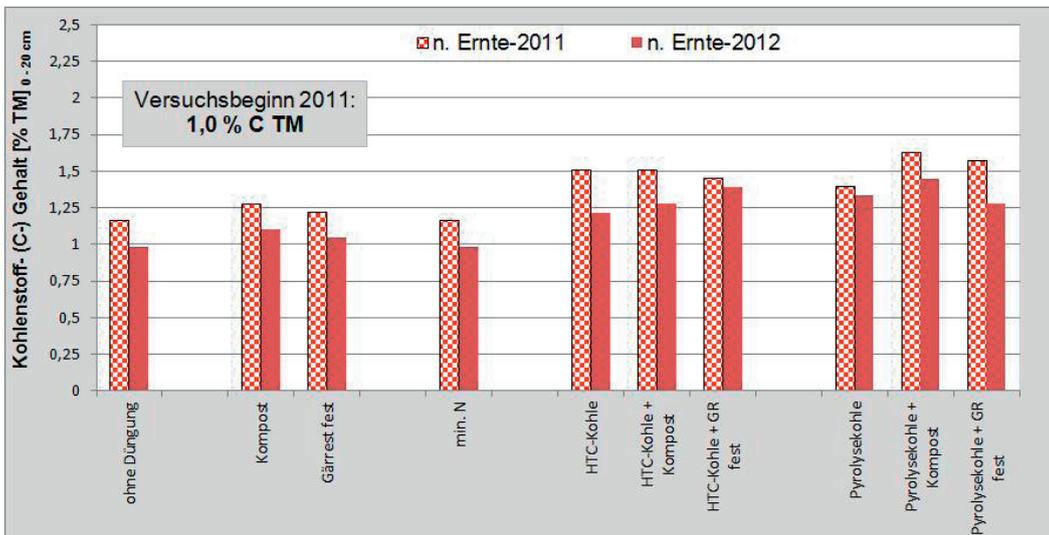


Abbildung 8 Kohlenstoff- (C-) Gehalte [% TM von 0 bis 20 cm] am Standort „March“

Anders verhält es sich am Standort „March“. Hier waren die  $N_{min}$ -Werte bislang durchwegs deutlich höher - insbesondere nach dem 1. Versuchsjahr - . Besonders auffällig sind auch die verringerten Nitratwerte bei den Versuchsgliedern mit Pyrolyse-Kohle-Zugabe. Ertragsniveau und  $N_{min}$ -Werte unterstreichen den Standortvorteil „March“ und erschweren eine Aussage, inwieweit die Zufuhr von Biokohle für eine Ertragsverbesserung nützlich war. Im Falle hoher Bodengüte und gleichmäßiger Witterungsbedingungen liegen die Vorteile einer Biokohle-Gabe wohl eher auf Seiten der oft diskutierten C-Sequestrierung.

Auf beiden Standorten haben die C-Gehalte (kein Humus im herkömmlichen Sinn!) ohne Zufuhr von Biokohle - insbesondere am Standort Forch-

heim - abgenommen und unterschreiten teilweise das Ausgangsniveau. Bei einem vergleichsweise niedrigen Humus-Startwert am Standort „March“ sind die C-Gehalte in Folge der Versuchsdüngung deutlicher angestiegen - insbesondere in Folge einer HTC-Kohlezufuhr - als am Standort „Forchheim“. Da es sich bei „March“ um eine Fläche handelt, die langjährig mit nahezu 100 % Körnermais bewirtschaftet wurde und „nur“ ca. 1 % C zu Beginn der Versuchsreihe aufweist, könnte dies ein Hinweis darauf sein, dass die Zugabe von Biokohle den C-Einbau in stabilere Humusformen gefördert hat. Der intensive (C-) Stoffwechsel der C-Quelle „Maisstroh“ blieb davon eher unbeeinflusst. Am Standort „Forchheim“ deutet sich an, dass mehr Kohlenstoff verbraucht als über die Düngung zugeführt wurde.

Die Grundnährstoffe **Phosphat, Kali** und **Magnesium** sowie die **pH-Werte** der Böden zeigen bislang keine Reaktion auf die Versuchsanstellung. Überrascht hat dies besonders beim Phosphat im System mit Pyrolysekohle, da in diesem Falle hohe P-Frachten (Tab. 4) ausgebracht wurden, die sich bislang weder in der löslichen P-Fraktion des Bodens, noch in den P-Gehalten der Ernteprodukte niedergeschlagen haben.

### Fazit (vorläufiges)

Die vorliegenden Versuchsergebnisse über zwei Vegetationsperioden mit Körnermais und Winterweizen lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Kornerträge und -qualitäten unterscheiden sich nicht signifikant zwischen den mit Biokohle behandelten bzw. unbehandelten Versuchsgliedern bei ausgeglichener N-Versorgung.
- Erwartungsgemäß führt eine Biokohle-Zufuhr zu einem Anstieg der C-Gehalte im Boden. Es ist anzunehmen, dass die Prozesse, die zu einem höheren Anteil an Dauerhumus führen, nach 2 Jahren noch nicht abgeschlossen sind. Hierzu bedarf es der Beobachtung über einen längeren Zeitraum.
- Im Falle einer Kombination von Biokohle mit Kompost bzw. Gärrest fest sind die C-Gehalte in den meisten Fällen höher. Dies weist auf eine positive Wechselwirkung hin, da Kompost bzw. Gärrest fest allein ausgebracht, diesen Effekt weniger deutlich zeigen.
- Es ist bekannt, dass die pyrogene Kohle die Fähigkeit besitzt, Ammonium- und Kali-Ionen in größerem Umfang zu binden. Somit könnten Biokohlen dieses Typs einerseits für den Einsatz im Grundwasserschutz an Bedeutung gewinnen, andererseits aber auch bei ihrer direkten Aufbringung auf Ackerböden zunächst eine Ammonium- und/oder Kalifixierung bewirken. Deshalb ist vor einem Einsatz von Biokohlen der Versorgungszustand der Böden insbesondere mit Kali zu prüfen oder eine vorherige Behandlung der Kohlen empfehlenswert, um Ertragsminderungen zu vermeiden.
- Zum heutigen Zeitpunkt können noch nicht alle positiven wie negativen Auswirkungen einer Zufuhr von Biokohle beschrieben werden, jedoch lässt sich feststellen, dass förderliche Ei-

genschaften eher auf leichteren („schwächeren“) Standorten zu beobachten sein werden.

- „Biokohle“ kann dann in der Landwirtschaft als Zusatzstoff an Bedeutung gewinnen, wenn die verwendeten Ausgangssubstrate bekannt und vor allem hinsichtlich ihrer stofflichen Zusammensetzung unbedenklich sind, wenn die zu behandelnden Böden „Schwachstellen“ bspw. eine schlechte Wasserversorgung oder hohe Schadstoffgehalte (anorganisch wie organisch) aufweisen (Sanierungsfälle) und wenn die Kosten für eine fachgerechte Zufuhr von 20 bis 30 t FM/ha Biokohle in einem finanzierbaren, aber auch konkurrenzfähigen Bereich liegen.

### Literatur

BLACKWELL, P. G. RIETHMULLER, M. COLLINS (2009): Biochar Application to Soil. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. London. Sterling, VA: Eathscan, 2009. Ed. Lehmann J, Joseph S.

BUTTMANN M. (2011): Klimafreundliche Kohle durch Hydrothermale Karbonisierung von Biomasse, Chemie Ingenieur Technik 2011, 83, No II, 1890-1896.

GLASER, B., J. J. BIRK (2012): State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earth in Central Amazonia, Terra Preta de Índio. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82, 39 - 51.

MANN, C. C. (2002): The real dirt on rainforest fertility. *Science* 297(9), 920-923.

RÖNSCH, S. (2011): Optimierung und Bewertung von Anlagen zur Erzeugung von Methan, Strom und Wärme aus biogenen Festbrennstoffen, Deutsches Biomasse Forschungszentrum, Leipzig.

SCHMIDT, H. - P. (2011): Pflanzenkohle, *Ithaka-journal*, Delinat-Institut für Ökologie und Klimafarming, 75-82. ■