



# CarboSolum - Schlussbericht

## Schlussbericht

zu einem Rentenbankvorhaben, gefördert aus dem Zweckvermögen

**Zuwendungsempfänger:** LTZ

**Förderkennzeichen:** Z 20067

**Vorhabenbezeichnung:** CarboSolum - Effiziente und ökologische Nutzung von Biokohle aus verschiedenartig carbonisierter Restbiomasse zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft

### Punkte I und II nach Muster Nr. 3.2. (veröffentlichter Teil)

#### I 1. Aufgabenstellung

Biokohleprodukte aus unterschiedlichen Techniken (Pyrolyse, HTC) sollten auf ihre Einsatzmöglichkeit in der Landwirtschaft getestet werden. Bezüglich der Ausgangs-biomassen interessierten vor allem die Nutzungspfade Biogas sowie Grünschnitt. Über drei Jahre hinweg sollten wichtige Parameter zur Anwendung der Biokohlen im Ackerbau bestimmt werden, die über ihre Eignung als Bodenverbesserungsmittel entscheiden. Neben Ernte-, Nährstoff- und Bodenparametern waren andere Kenndaten wie die Frage der biologischen Stabilität bei Biokohlen sowie mögliche Anwendungsrisiken (physikalische, chemische sowie biologische Effekte) wichtig. Basierend auf Stoffstrom- und Kosten-Nutzen-Analysen sollte eine ökonomisch-ökologische Gesamtbewertung der jeweiligen Biomassenutzungspfade erfolgen. Aus der Erfolgsbilanz und den Beobachtungen während der Anwendungspraxis sollten Mindeststandards sowie Anwenderoptionen für Biokohlen sowohl für die Landwirtschaft als auch die Biokohleproduktion abgeleitet werden.

#### I 2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die Idee der Nutzung von Holzkohle und Biokohlen zur Fruchtbarkeitssteigerung von Böden nach dem Vorbild der *Terra preta* weckte seit einigen Jahren weltweit verstärktes Forschungsinteresse. Zusätzlicher Auftrieb entstand durch die Weiterentwicklung von Verfahren zur emissionsarmen, effizienten Restbiomasseverwertung. Innovative Verkohlungs-techniken – insbesondere deren Endprodukte - boten so neue Verwendungsmöglichkeiten als Bodenzusatzstoff. Die Fragestellung seitens der Landwirtschaft lag insbesondere darin, ob hierdurch Verbesserungen hinsichtlich einer



effizienten und ökologischen Nutzung landwirtschaftlicher Reststoffe im Sinn geschlossener Stoffkreisläufe und nachhaltiger Bodenverbesserungen erzielbar wären.

Die prozesstechnischen Voraussetzungen waren grundsätzlich vorhanden, zum einen durch die Firma Pyreg GmbH für pyrolytisch erzeugte Kohle (langsame Pyrolyse), zum anderen durch die Firma AVA-CO2 GmbH für Kohle aus hydrothormaler Carbonisierung (HTC-Kohle). Sowohl für Feld- als auch Gefäßversuche standen zwei geeignete Standorte bzw. deren Böden mit unterschiedlichen Eigenschaften zur Verfügung. Durchführung und Erfolgskontrolle der Projektarbeiten lagen je nach fachlichem Schwerpunkt im Aufgabenbereich des LTZ Augustenberg, der KIT-Institute IKFT bzw. DFIU, des Büros für Nachhaltigkeits-Projekte (Dr. C. Holweg) und der Universität Freiburg (Bodenökologie).

### **I 3. Planung und Ablauf des Vorhabens**

Geplant war, Biokohlen aus zwei Prozessen herzustellen (Pyrolyse, HTC), und insgesamt fünf Karbonisierungsstufen zu realisieren. Für die Verkohlung über Pyrolyse waren „Siebreste aus der Landschaftspflege (LP)“ (holzige Reste aus ausgesiebttem Grünschnitt) und „Gärreste (GR) aus der Biogasgewinnung“ (Silagebasis Mais/Roggen/Gras) vorgesehen. Für die Verkohlung über HTC waren ebenfalls Gärreste vorgesehen, deren Produkte je nach prozesstechnischer Einstellung in drei Stabilitätsgraden vorliegen sollten. Bei pyrolytisch erzeugter Biokohle sollte anhand gegensätzlicher Ausgangsbiomassen zusätzlich eine spezielle Wirkung im Vergleich hochporiger Ausgangssubstrate wie Holz gegenüber Nichtholz-Biokohlen geprüft werden. Die fünf Biokohlen wurden für Gefäß- bzw. Feldversuch mit einer Auftragsmenge von 10 t/ha und/bzw. 20 t/ha über den Projektzeitraum von drei Jahren eingeplant. Zusätzliche Varianten waren die kombinierte Anwendung von Gärresten und Kompost, um Synergie- und Kompensationswirkungen zu erfassen. Um eine mögliche Ertragsbeeinflussung in Folge der Kohle-Gaben durch eine potentiell positive oder auch negative zusätzliche Düngewirkung zu testen, wurde eine kulturabhängige Stickstoff-Düngung im Feld- wie im Gefäßversuch eingeplant. Hierdurch sollte - ausgehend vom N-Gehalt der Zusätze – mit einem Ammonium-N-stabilisierten mineralischen Dünger (Entec 26) entsprechend eine Ergänzungsdüngung vorgenommen werden. Im Gefäßversuch wurden zusätzlich die Nährstoffe Kali und Magnesium in flüssiger Form während der Wachstumsphase gedüngt. Als Kulturfolge waren Mais (Körnermais), Winterweizen (B-Weizen) und Sommergerste (Braugerste) im Feld- wie im Gefäßversuch geplant.

Bei der Herstellung größerer Kohlemengen aus Gärrest traten in beiden Verfahren technische Schwierigkeiten auf. Für die Feldversuche ließ sich im Fall der HTC-Technik Substratersatz in Form von Birtreber finden (Kohleprodukt: HTC-BT). Bei Pyrolyse wurde Kohle aus Landschaftspflegematerial verwendet (=pyro-LP). Da die Verkohlung von Gärresten in kleinen Mengen möglich war (pyro-GR, HTC-GR), konnten die Gefäßversuche mit vier Biokohlen unterschiedlicher Qualität und Stabilität durchgeführt werden (HTC-BT/HTC-GR; pyro-LP/pyro-GR). Die frei gewordenen Positionen wurden durch verschiedene Biokohle-Kompost-Varianten sowie

HTC/pyro-Kohle-Mischansätze ersetzt bzw. nachträglich belegt. In Folge der verzögerten Herstellung der Versuchskohlen verschob sich die im November/Dezember 2010 geplante Ausbringung der Biokohlen auf April 2011, sodass die Zeit bis zur Aussaat nur noch 7 Wochen betrug. Die Zeit reichte jedoch offenbar aus, um mögliche Nährstoffkonkurrenzen aufgrund der Adsorptionswirkung frisch hergestellter Kohlen auszugleichen. Mit Hilfe der Projektverlängerung wurde ein Beobachtungszeitraum von insgesamt drei Vegetationsperioden abgedeckt.

Die Kohlen wurden von Hand auf die Versuchspartzen ausgebracht. Für die Praxis sollten geeignete Techniken (z.B. Festmiststreuer) diskutiert werden. Pyro-LP-Kohle lag trocken und in verschiedenen Korngrößen vor. Sie konnte einfach verteilt werden, war jedoch anfällig für Winderosion. Da zum Projektbeginn keine geeigneten Trocknungstechniken für HTC-BT-Kohle vorhanden waren, war das Verteilen der sehr feuchten Biokohle-Massen schwierig und sehr zeitaufwändig mit der Folge, dass trotz Einarbeitung mittels Kreiselegge über das zweite Jahr hinaus noch Kohle-Klumpen sichtbar waren. Die inhomogene Verteilung musste bei der Beurteilung mancher Parameter berücksichtigt werden. In Folge starker Auswinterungsschäden in 2012 am Standort „March“ wurde die Fruchtfolge aufgegeben und in eine für die Region typische Mais-Monokultur abgeändert, sodass nun der direkte Vergleich beider Standorte hinsichtlich der Fruchtfolge wegfiel. Ernte-, Boden- und Nährstoffparameter sowie bodenbiologische Effekte wurden wie geplant im jährlichen Turnus erhoben. Alle zur Düngung eingesetzten Biomassen und Biokohlen wurden auf chemische und – soweit nötig – auf physikalische Kenndaten hin untersucht. Bei den HTC-Kohlen wurden auch die wässrigen Bestandteile bestimmt. Perkolationstests sollten abschätzen, inwiefern sich einzelne Komponenten als Stofffrachten im Boden verlagern können. Für alle Produkte wurden ökotoxikologische und biologische Tests zur Bestimmung der Umweltverträglichkeit durchgeführt. Tests zur Abbaustabilität sollten das CO<sub>2</sub>-Einsparpotential der Biokohlen einschätzen. Für eine spätere Kosten-Nutzen-Analyse wurden die beiden Prozesse (HTC und Pyrolyse) hinsichtlich ihres energetischen Aufwands und ihrer Effizienz je nach Ausgangsbiomasse und dem Nutzen der Biokohlen für Ertrags- und Bodenparameter charakterisiert. Für einige Versuche war eine engere Zusammenarbeit zwischen einzelnen Partnern nötig (z.B. Perkolationstest).

#### **I 4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Zum Zeitpunkt der Antragstellung lagen einige vielversprechende Ergebnisse zum Pflanzenwachstum nach Biokohle-Gaben vor (Ref. 1 - 3), diese allerdings mehrheitlich aus Kurzzeit-Experimenten im Gefäßversuch bzw. für pyrolytische Kohlen auch vielfach aus anderen klimatischen Naturräumen. Langfristige Beobachtungen fehlten bis auf wenige Ausnahmen (Ref. 2, 3). Während die allgemeine Erprobung pyrolytisch gewonnener Kohlen schon vor längerer Zeit begonnen hatte, waren Daten zu Produkten aus der Karbonisierung über HTC noch selten (Ref. 4, 5). Die Technik stand aufgrund der Verwertungsmöglichkeit feuchter Restbiomassen und der günstigen Energieeffizienzprognosen besonders zur Diskussion (Ref. 6). Zudem hatten Laborversuche am IKFT

eine gute Standardisierbarkeit der Produkteigenschaften je nach Prozessführung unter Beweis gestellt, was die Herstellbarkeit von HTC-Kohlen in unterschiedlichen Karbonisierungsstufen grundsätzlich belegte.

Aufgrund der niedrigen Deckungsbeiträge im betreffenden Landwirtschaftssektor galt als Vorgabe eine möglichst kostengünstige Anwendungsmethode. Da eine Vorteilhaftigkeit vorbehandelter Biokohle hinsichtlich der Nährstoffbeladung und anderer Eigenschaften diskutiert wurde (Stichwort: Vorbehandlung mit Komposten, Ref. 2, 7), bestand die pragmatische Lösung in der gleichzeitiger Aufbringung von Kohlen und Kompost bzw. Gärrest. Im Vergleich dazu wurden die organischen Komponenten sowie die Biokohlen alleine aufgetragen. Die Kohlen wurden in Demonstrationsanlagen der Fa. AVA-CO<sub>2</sub> (HTC, Ref. 8) beziehungsweise Fa. Pyreg (Pyrolyse, Ref. 9) erzeugt. Für beide Verfahren liegt ein Patentschutz vor.

### **Verwendete Fachliteratur und Dokumentationsdienste**

- Ref. 1 Biochar for Environmental Management (2009): Science and Technology. Edited by Johannes Lehmann and Stephen Joseph. Published by Earthscan.
- Ref. 2 Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A.C., van der Velde, M., Diafas, I. (2010) Biochar Application to Soils, A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions, JRC Scientific and Technical Reports, 166 p.
- Ref. 3 Liu, J., Schulz, H., Brandl, S., Miehtke, H., Huwe, B and Glaser, B. (2012) Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions. DOI: 10.1002/jpln.201100172.
- Ref. 4 BIOKOHLE WORKSHOP Justus-Liebig-Universität 23./24.02.2010. Deutsche Gesellschaft für Pflanzenernährung Kommission IV – Pflanzenernährung und Bodenfruchtbarkeit der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. Gießen.
- Ref. 5 Hydrothermale Carbonisierung – Chancen für die Landwirtschaft? Grüne Woche Berlin Januar 2011. <http://veranstaltungen.fnr.de/hydrothermale-carbonisierung/>
- Ref. 6 <http://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Landwirtschaft/Bioenergie-NachwachsendeRohstoffe/HTC-Antonietti.html>
- Ref. 7 Steiner, C., Glaser, B., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Blum, W. E. H., and Zech, W., 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. Journal of Plant Nutrition and Soil Science 171(6): 893-899
- Ref. 8 <http://www.ava-co2.com/web/pages/de/home.php>
- Ref. 9 <http://www.pyreg.de>
- Ref. 10 LUBW 2008

### **I 5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Es erfolgte ein Austausch mit Wissenschaftlern während diverser Fachveranstaltungen zu Biokohle: z.B. Europäische Biokohle-Tagung Halle 2012 und Como 2013, Biokohle-Tagung Potsdam 2012 (ANS e.V) und Campus Birkenfeld 2013, Sonderthemen bei Tagungen VDLUFA 2013 und DGB Arbeitsbereich Bodenbiologie 2012). Neben dem fachlichen Austausch an Tagungen wurden mit

einzelnen Wissenschaftlern (TI, JKI) engere Kontakte zur Sachberatung und zum vertiefenden Austausch über Ergebnisse und Vorgehensweisen gepflegt (Gesprächsbesuche bei Plenumstreffen 2011, 2013 am LTZ Karlsruhe). Zu Fragen der rechtlichen Einordnung von Biokohle für die Verwendung als Düngehilfsstoff holte das Verbundprojekt Auskunft beim BMELV ein (Referat 511 Pflanzenbau). Als Beitrag zur Diskussion über die PAK-Bestimmung bei Biokohlen wurde die Fa. Eurofins als bekannte Anlaufstelle für PAK-Analysen bei Biokohlen befragt. Die Verbundgruppe führte acht Plenumstreffen durch, über die die BLE bis auf eine Ausnahme informiert wurde. Den Biokohle-Herstellern wurde eine Ergebniszusammenfassung ausgehändigt und die Möglichkeit einer Frage- und Austauschrunde in Aussicht gestellt.

## **II. Eingehende Darstellung**

*II. 1. Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele*

### **II 1.A. Herstellungserfolg bei den gewünschten Biokohlen** (Zuordnung Arbeitspaket LTZ\_0).

Für die Durchführung waren Biomassen bzw. Biokohlen nötig, deren Beschaffung sich teilweise als sehr aufwändig herausstellte. Herstellungsprobleme größerer Mengen Biokohle aus Feststoff-Gärresten und Anforderungen an die Biomassefeuchte machten einige Zusatzschritte nötig (Trocknung, Lieferung mit Entfernungen bis 200 km). Die Karbonisierung selbst erforderte mehrere Anläufe: Bei HTC stellte sich die Anlagenauslegung für die gewählte Gärrestmischung als noch nicht genügend angepasst heraus, sodass das Ziel, Biokohle in drei abgestuften Karbonisierungsgraden herzustellen, noch nicht möglich war. Bei Pyrolyse verursachte die starke Vortrocknung der Gärreste (auf 85 % TS-Gehalt über Abwärmenutzung einer Biogasanlage) eine so ungünstige Konsistenz, dass der normale Verkohlungsprozess gestört war. In kleinen Mengen (50 kg) konnten alle geplanten Biomassen erfolgreich zu Biokohle umgesetzt und diese in Gefäßversuchen getestet werden. Statt geplanter fünf Kohlevarianten für Feld- und Gefäßversuche wurde folgendes Muster bearbeitet:

- HTC-Gärreste (HTC-GR)                      kleine Menge (nur Gefäßversuch)
- pyro-Gärreste (pyro-GR)                    kleine Menge (nur Gefäßversuch)
- HTC-Biertreber (HTC-BT)                    große Menge (Feld- und Gefäßversuch)
- pyro-Landschaftspflege (pyro-LP)        große Menge (Feld- und Gefäßversuch)

Aus den beschriebenen Schwierigkeiten resultierten wichtige Erfahrungen für die Firmen einschließlich der Betreiber der Biogasanlage in Bezug auf die Verarbeitbarkeit des Materials und möglicher technischer Anpassungen.

### **II 1.B. Ausbringetechniken für Biokohlen im Feld** (Zuordnung Arbeitspaket LTZ\_0).

Wie unter Nr. I 3 erwähnt, mussten im Feld für den Ausfall zweier Kohlevarianten alternative Belegungen gefunden werden. Dies brachte den Vorteil mit, auch andere Ausbringetechniken zu erproben. Aus Sicht einer kostengünstigen landwirtschaftlichen Anwendungstechnik wäre für die Praxis an den Einsatz herkömmlicher „Kompost- oder Festmiststreuer“ zu denken. Die Möglichkeit hängt jedoch maßgeblich von der Konsistenz des Materials ab. HTC-Kohlen wären in getrockneter

Form mit flockiger bis pulverförmiger Konsistenz zwar leicht zu verteilen, jedoch in purem Zustand problematisch (Gefahr von Winderosion, Staub-entwicklung). Ebenso ungeeignet ist feucht-klumpiges Material, wie es für den Versuch vorlag (TS-Gehalt 44 %) da diese Konsistenz zu erschwerter Verteilung und Mischung im Boden führte (bis zum zweiten Jahr lagen noch Klumpen von mehreren Zentimetern Größe vor; s. IKFT-Bericht). Anders verhielt es sich mit rieselfähiger pyro-Kohle (Partikelgröße: < 0,5 bis 1,5 cm). Wie sich durch nachträglich hergestelltes ko-kompostiertes bzw. ko-siliertes Material mit pyro-Kohle zeigte, ist die Partikelanhaftung rieselfähiger Kohlen an organische Trägerstoffe von Vorteil. Auch Kompoststreugeräte sind so ohne Verwehungsgefahr einsetzbar. Allerdings führte Wassererosion in den Folgejahren auch in diesen Varianten zu einer sichtbaren Abdrift oberflächennaher Partikel (besonders gut bei Größen > 0,5 cm).

**II 1.C. Ernteergebnisse und Nährstoffsituation aus Feld- und Gefäßversuchen** (Zuordnung Arbeitspaket LTZ\_1-3; LTZ\_9)

**Feldversuche**

Die Aufnahme von Ernte- und Nährstoffparametern konnte wie geplant ausgeführt werden.

**Tabelle 1: Übersicht Varianten der Feldversuche:** VG = Versuchsglied (Variante); SR = Siebreste, BT = Biertreber; sil.: aus Silageansatz; komp.: aus Kompostansatz; VG 11 – VG 14: Versuchsdüngung erfolgte nach der Ernte des 1. Versuchsjahres

**Varianten für Feldversuch March**

**Varianten für Feldversuch Forchheim**

VG 1	Nullfläche	VG 1	Nullfläche
VG 2	Kompost (40 t FM/ha)	VG 2	Kompost
VG 3	Gärrest fest (20 t FM/ha)	VG 3	Gärrest fest
VG 4	ausschl. mineralische Düngung	VG 4	ausschl. mineralische Düngung
VG 5	HTC-BT	VG 5	HTC-BT
VG 6	HTC-BT + Kompost	VG 6	HTC-BT + Kompost
VG 7	HTC-BT + Gärrest fest	VG 7	HTC-BT + Gärrest fest
VG 8	Pyro-SR	VG 8	Pyro-SR
VG 9	Pyro-SR + Kompost	VG 9	Pyro-SR + Kompost
VG 10	Pyro-SR + Gärrest fest	VG 10	Pyro-SR + Gärrest fest
VG 11	wenig HTC-BT (sil.)	VG 11	Kompost pur 20 t TM/ha
VG 12	viel HTC-BT (sil.)	VG 12	Kompost pur 40 t TM/ha
VG 13	wenig Pyro-SR (komp.)	VG 13	Ko-Kompostierung mit Pyro-SR 10 t
VG 14	viel Pyro-SR (komp.)	VG 14	Ko-Kompostierung mit Pyro-SR 20 t

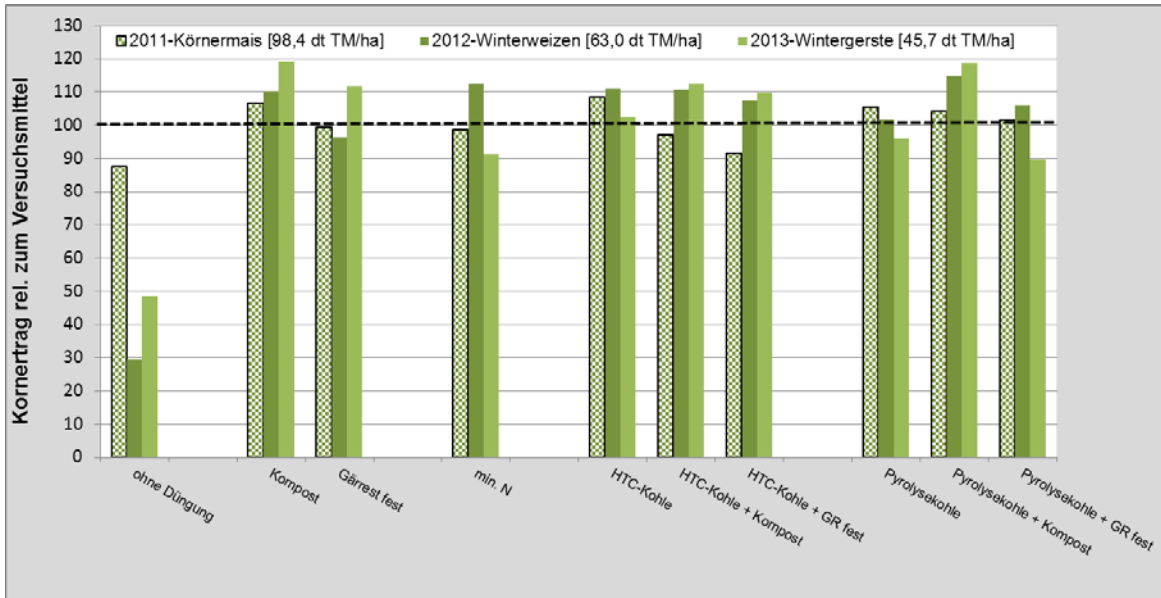


Abb. 1. Kornerträge am Standort Forchheim (2011 bis 2013) (Bodenart lehmiger Sand)

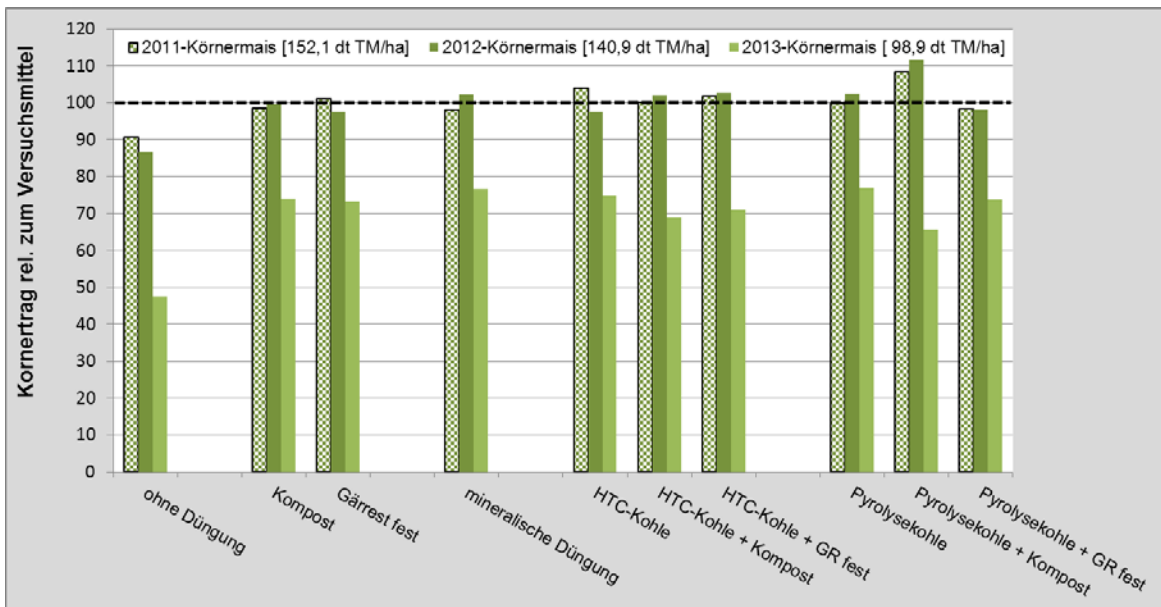


Abb. 2. Kornerträge am Standort March (2011 bis 2013). (Bodenart schluffiger Lehm)

Bei den Parametern Kornmasse, Tausendkorngewicht sowie Inhaltsstoffe N, P und K gab es nur zu Variante 1 „ohne N-Düngung“ signifikante Unterschiede. Allerdings wies die Variante pyro-Kohle plus 20 t TM/ha Kompost (VG 9) in allen Erntejahren ein tendenziell besseres Ertragsniveau am Standort Forchheim auf (Abb. 1, 2). Die Rohproteingehalte zeigten keine Reaktion auf die erfolgte Versuchsdüngung mit Ausnahme der Varianten „pyro-Kohle pur“ (VG 8) und „Pyro-Kohle mit Gärrest“ (VG 10) am etwas weniger gut versorgten Standort („Forchheim“).

### Nährstoffsituation (vorläufiges Fazit):

- Keine signifikanten Veränderungen bei den löslichen Nährstoffen (P und K)
- Die Zufuhr von Biokohle (insbesondere bei HTC-Kohle aus N-reichem Biertreber) führte zur Erhöhung der Gesamt-N-Gehalte an beiden Standorten. Da dieser Stickstoff relativ fest gebunden ist, kam es jedoch zu keiner unkalkulierbaren N-Freisetzung (s.  $N_{\min}$ -Werte!).
- Die v.a. mit pyro-Kohle zugeführten sehr großen P-Mengen sind wenig löslich (keine Veränderung der löslichen CAL-Phosphatwerte). Dies ist (vgl. N-Dynamik) angesichts des vorgegebenen Rahmens der P-Bilanzierung nach DüV von Bedeutung.
- Die C-Gehalte der Biokohle-Varianten sind erwartungsgemäß leicht erhöht.
- Keine N-Immobilisierung; die N-Effizienz im Fall kombinierter Düngung (Kohle plus Zusatzstoff) war vereinzelt sogar besser als bei mineralischer N-Düngung allein (VG 4).
- Ein Aufbau stabiler Humusformen ist tendenziell über die höheren C/N-Verhältnisse erkennbar (zu berücksichtigen sind jedoch die kurze Zeitschiene, die Probenahme, die Durch/Entmischung sowie die langjährige Bewirtschaftung).
- Um einen möglichen Biokohle-Effekt besser sichtbar zu machen (ausgehend von der Bindekapazität für Nährstoffe), wurde die N-Düngermenge im letzten Vegetationsjahr reduziert. Dies hatte jedoch keine signifikanten Ertragseffekte zur Folge.

### **Gefäßversuche**

Im Vergleich zum Feldversuch ergeben sich deutlichere Ertragsunterschiede zwischen den Behandlungen (Tab. 2). Die Erträge mit Boden vom Standort „Forchheim“ lagen in allen Jahren signifikant über denen mit Boden aus „March“. Dies muss auf die unterschiedliche Bodenstruktur und davon abhängig einen günstigeren Wasserhaushalt mit entsprechend unterschiedlichem Wurzelwachstum und Nährstoff-aneignungsvermögen zurückgeführt werden, da der Boden aus Forchheim einen geringeren Ton- und einen höheren Sandanteil aufweist und so besser für Gefäßversuche geeignet ist. Die Kernaussage zum Einfluss der Düngungsvarianten im Versuch wird hierdurch jedoch nicht beeinträchtigt. Sehr hohe Gaben mit Pyro-GR-Kohle (50 t/ha) führten allgemein zu einem Absterben der Pflanzen im Jugendstadium.

### **(vorläufiges) Fazit**

Die 3 jährigen Gefäßversuche mit der Fruchtfolge „Körnermais – Sommerweizen – Sommergerste“ bestätigen aus pflanzenbaulicher Sicht,

- dass die optimale Aufwandmenge für die geprüften Biokohlen zwischen 10 und 20 t FM/ha liegen sollte,
- dass die mit den Biokohlen ausgebrachten Nährstoffe anfänglich wenig ertragswirksam werden (Mobilisierungsprozesse),
- dass eine zusätzliche N-Düngung Erträge und Qualität absichert,



- dass eine Zusatzdüngung mit organisch-mineralischen Düngern wie Gärresten und insbesondere Komposten in allen Fällen positiv ertragswirksam war und daher sehr zu empfehlen ist,
- dass die ausgebrachten Nährstoff-, insbesondere N-Mengen mittel- bis langfristig zu betrachten sind (Nährstoffsalden – DüV!),
- dass sich Kenngrößen der Bodenfruchtbarkeit wie pH-Wert, Grundnährstoffe und Gesamt-N- sowie Gesamt-C-Gehalte durchaus positiv entwickeln,
- dass hieraus keine ökologischen Unwägbarkeiten zu erwarten sind und
- dass sowohl pflanzenbauliche Eigenschaften allgemein wie spezielle Faktoren der Bodenfruchtbarkeit mittelfristig positiv beurteilt werden können.

**Tabelle 2: Erträge in den Einzeljahren und in der Summe über die Jahre [g TM/Gefäß]**

Biokohle	Zusatzdüngung	2011		2012		2013		Summe	
		Fo	March	Fo	March	Fo	March	Fo	March
ohne BK	ohne Düngung	19,0 <sup>1</sup>	40,1	7,4 <sup>1</sup>	5,7	7,5 <sup>1</sup>	6,0	33,8 <sup>1</sup>	51,7
	mineralisch N <sup>1</sup>	115,8 <sup>1</sup>	88,9	43,4 <sup>1</sup>	38,2	46,5 <sup>1</sup>	31,6	205,6 <sup>1</sup>	158,6
	GR fest <sup>1</sup>	118,9 <sup>1</sup>	102,2	51,1 <sup>1</sup>	47,0	49,8 <sup>1</sup>	37,4	219,7 <sup>1</sup>	186,5
HTC-GR	ohne GR-Zusatz	91,9 <sup>1</sup>	56,8	60,3 <sup>1</sup>	47,1	49,0 <sup>1</sup>	33,3	201,2 <sup>1</sup>	137,1
	mit GR fest <sup>1</sup>	95,9 <sup>1</sup>	58,6	60,1 <sup>1</sup>	56,6	52,5 <sup>1</sup>	42,2	208,4 <sup>1</sup>	157,4
	Kompost <sup>1</sup>	100,1 <sup>1</sup>	68,2	66,4 <sup>1</sup>	55,6	51,9 <sup>1</sup>	43,6	218,4 <sup>1</sup>	167,4
HTC-BT	ohne GR-Zusatz	104,0 <sup>1</sup>	94,1	60,7 <sup>1</sup>	56,5	45,2 <sup>1</sup>	37,7	209,9 <sup>1</sup>	188,4
	mit GR fest <sup>1</sup>	111,4 <sup>1</sup>	149,7	62,0 <sup>1</sup>	55,2	37,5 <sup>1</sup>	43,7	210,8 <sup>1</sup>	248,6
	Kompost <sup>1</sup>	120,3 <sup>1</sup>	113,4	65,3 <sup>1</sup>	60,7	55,1 <sup>1</sup>	47,2	240,6 <sup>1</sup>	221,2
Pyro-LP	ohne GR-Zusatz	100,4 <sup>1</sup>	86,2	62,5 <sup>1</sup>	52,8	65,4 <sup>1</sup>	57,8	228,2 <sup>1</sup>	196,8
	mit GR fest <sup>1</sup>	93,6 <sup>1</sup>		67,6 <sup>1</sup>		66,3 <sup>1</sup>		227,5 <sup>1</sup>	
	Kompost <sup>1</sup>	79,5 <sup>1</sup>	56,0	64,8 <sup>1</sup>	57,4	66,4 <sup>1</sup>	55,8	210,6 <sup>1</sup>	169,2
Pyro-GR	ohne GR-Zusatz	110,7 <sup>1</sup>	84,3	58,9 <sup>1</sup>	41,1	43,4 <sup>1</sup>	34,8	213,0 <sup>1</sup>	160,2
	mit GR fest <sup>1</sup>	105,3 <sup>1</sup>	81,6	59,9 <sup>1</sup>	43,2	54,3 <sup>1</sup>	38,9	219,5 <sup>1</sup>	163,7
	Kompost <sup>1</sup>	116,5 <sup>1</sup>	97,6	65,6 <sup>1</sup>	46,4	59,7 <sup>1</sup>	39,0	241,8 <sup>1</sup>	183,0

\*) BK-Varianten: 20 t FM/ha - Kompostvariante: 20 t TM/ha

Die Erträge der Versuchsglieder mit „Boden Forchheim“ waren mit wenigen Ausnahmen höher (teilweise signifikant) als im Block mit „Boden March“. Dies kann auf die für Gefäßversuche besser geeignete Bodenstruktur in Verbindung mit einem günstigeren Wasserhaushalt des „leichteren“ Bodens „Forchheim“ zurückgeführt werden.

Im Versuchsblock „HTC-Kohle + Boden Forchheim“ war der Ertragsvorteil in der Reihe „mit Gärrestzugabe“ kleiner als beim Boden „March“ (104 % gegenüber 121 %). Dieser Ertragsvorsprung war dagegen im Block mit „Pyrolysekohle“ insbesondere in der Versuchsreihe mit Boden „Forchheim“ nicht mehr so deutlich (101 % gegenüber 107 %).

Im Mittel über alle Varianten hatte eine Zugabe von 50 % bzw. 100 % Kompost in Kombination mit den jeweiligen Biokohlen in der Versuchsreihe mit dem Boden „Forchheim“ 7 % bzw. 14 % und mit dem Boden „March“ 10 % bzw. 16 % Mehrertrag gegenüber „ohne Kompost“ zur Folge. Herkunft und Art der jeweils zugesetzten Biokohle hatten keinen signifikanten Einfluss auf das Ergebnis.

#### **Bodenphysikalische und sonstige Kennwerte (Zuordnung Arbeitspaket LTZ\_1-3)**

Auf Grund der Basizität von Pyro-Kohle waren in den entsprechenden Parzellen ein leichter pH-Anstieg in March (von 7,3 auf 7,4) und ein höherer Anstieg in Forchheim (mit saureren Bodenverhältnissen) zu beobachten (von 5,8 auf 6 - 6,3).

Bei den Kenngrößen „Trockenraumdichte“, „nutzbare Feldkapazität“, „Gesamtporenvolumen“ und „Luftkapazität“ konnte nach einem Versuchsjahr kein unterschiedliches Muster festgestellt werden. Dies wurde auf die anfänglich noch unregelmäßige Verteilung der Kohlen zurückgeführt. Aber auch in den Folgejahren zeigten Wassergehalt und Aggregatstabilität keine Unterschiede. Leichte Effekte waren jedoch im Gesamtporenanteil (tendenzieller Anstieg um 2 % in Forchheim) und ein deutlicherer Unterschied beim Eindringwiderstand zu erkennen. Am Standort March ergaben Messungen mit dem Penetrometer im dritten Versuchsjahr bei Anwendung purer Kohlen sowie deren Mischungen mit Kompost oder Gärrest signifikante Unterschiede (Abnahme um 10 bis 14%) zu Flächen, die nicht bzw. nur mineralisch gedüngt wurden. Am Standort Forchheim mit sandig-kiesigem Boden war keine Effekte zu erkennen (Messprobleme bei hohem Kiesanteil). Am Standort Forchheim mit besonders strukturschwachem Boden zeigte sich durch die Ausbringung von Biokohlen und organischen Düngemitteln im ersten Jahr eine Tendenz zur Verbesserung der Aggregatstabilität. In March war dieser Effekt nicht zu beobachten.

**II 1.D. Tests zur Umweltverträglichkeit von Biokohlen** (Ökotox- und Biotests, Zuordnung Arbeitspaket LTZ\_11 Anlagen 8,9) wurden in Vollständigkeit durchgeführt und zum Teil erweitert (z.B. Geruchstest und Vergleich feuchter und trockener Kohlen in Anpassung an den Lieferzustand der Kohlen).

Die Analyse auf **Schwermetalle, PAK, Dioxin und AOX** erbrachte keine Belastungen im Vergleich zu gesetzlichen Grenzwerten nach der BioAbfV bzw. AbfKlärV bzw. BodSchV. **Ökotoxikologische Untersuchungen** (Fa. Hydrotox) zeigten im Leuchtbakterientest bei 10 %-iger Verdünnung für HTC-Kohlen noch eine 60 bis 70%-ige Hemmung (pyro-Kohlen ohne Hemmung). HTC-Kohle aus Biertreber (BT) zeigte sich etwas weniger bakterientoxisch als aus Gärresten (GR). Toxische Effekte traten vor allem bei wässrigen Bestandteilen („Prozesswasser“) auf, wenn in hoher Dosis eingesetzt. Der eingesetzte Wasserlinsen-Test war jedoch aufgrund der starken Färbung von Prozesswasser unzureichend für die Prüfung auf Toxizität des wässrigen Produktstroms von HTC-Kohle (ergänzende Aussagen lieferte eine Bachelor-Arbeit am IKFT (s. IKFT-Teil).

Beim **Biotest nach DIN ISO 17512 (Regenwurmvermeidungstest** mit *Eisenia foetida*; Standardboden LUFA 2.2) wurden Kohlen zu 1 Gew. % bis 10 Gew. % eingesetzt (HTC-Kohle feucht entsprechend dem Ausbringzustand). Bei feuchten HTC-Kohlen zeigte sich eine Hemmwirkung schon ab 1 Gew. % und fiel bei HTC-BT stärker aus als bei HTC-GR. Die negative Reaktion von HTC-BT kippte bei 0,5 %-iger Zugabe ins deutlich Positive um. Nach Vortrocknung der Kohlen ging die Hemmwirkung etwas zurück und wurde in Gegenwart von pyro-LP (je 1 %) noch weiter abgeschwächt. Für pyro-Kohlen wurde eine Hemmwirkung erst ab 5 % Kohle vermerkt bzw. unterblieb, wenn die starke Wasseradsorption der pyro-Kohle durch Zugabe von Wasser

ausgeglichen wurde. Niedrige Konzentrationen zeigten im Allgemeinen eine positive Reaktion. Für HTC-BT-Prozesswasser bei einer Konzentration von 10 ml/kg Boden war eine deutliche Fluchtreaktion zu beobachten, die bei 5 ml/kg wegfiel. In der Gegenüberstellung zu Biogas-Gülle schnitt HTC-Prozesswasser in beiden Konzentrationen sehr viel schlechter ab. In chronischen **Pflanzenwachstumstests** (DIN ISO 11269-2, Hafer, Chinakohl; 35 d auf Feldboden und Standardboden) zeigten pyro-Kohlen weniger negative Effekte im Vergleich zu HTC-Kohlen (verwendet zu 1, 2 bzw. 5 Gew. % entsprechend 13, 25 bzw. 63 t TM/ha im Fall des Bodens aus Forchheim). Nur pyro-Gärreste riefen in hoher Konzentration Wuchshemmungen hervor, was auf den hohen Mineral(Salz)gehalt zurückzuführen war. 1%-ige Gaben regten das Wachstum dagegen stark an (kurzfristiger Düngeeffekt). In hoher Konzentration führten HTC-Kohlen zu Blattspitzennekrosen. Die Beobachtungen wurden im Test nach Bundesgütegemeinschaft Kompost (Sommergerste, Einheitserde) in der Grundtendenz bestätigt. Ähnlich zur Regenwurmreaktion zeigte sich, dass die Mischung von je 2 % Pyro- und HTC-Kohle geringere Wachstumsdepressionen als 2 % HTC-Kohle alleine hervorrief. Die Keimung war allgemein nicht oder in höheren Konzentrationen nur wenig beeinträchtigt.

Da **Gerüche** gesellschaftlich bedeutend sind, wurde auch ein Augenmerk auf die Geruchswahrnehmung der Kohlen gelegt. Bei frischer, feucht eingesetzter HTC-Kohle aus Biertreber (BT) verloren sich typische Geruchsanhaftungen erst nach 2,5 Monaten nach Ausbringung am Ackerstandort. Blind-Geruchstests zeigten für frische, feuchte HTC-BT-Kohle eine mehrheitlich unangenehmere Empfindung im Vergleich zu trockener HTC-BT-Kohle oder HTC-Kohle aus Gärresten. Verbesserungen brachten auch Ko-Verrottungen mit Grünschnitt. Umgekehrt wirkten 10 Vol% pyro-Kohle geruchsverbessernd auf das Kompostergebnis selbst.

## II 1.E. Ergebnisse zur Bodenbiologie (Zuordnung Arbeitspakete LTZ 2, 11)

Bodenbiologische Untersuchungen auf Basis mikrobieller Biomasse und enzymatischer Aktivität wurden wie geplant durchgeführt. Feldprobenahmen erfolgten jeweils im Frühjahr als Mischprobe je Untersuchungsvariante und Tiefenstufe (bei den nachträglich angelegten Parzellen nur bis 30 cm Tiefe). Die quantitative Bestimmung der aktiven mikrobiellen Biomasse erfolgte durch substratinduzierte Respiration. March wies gegenüber Forchheim deutlich höhere Gehalte an **mikrobieller Biomasse** auf. Der Unterschied lässt sich unabhängig von Biokohle auf Bodenart und pH-Wert zurückführen (Ausgangssituation 2011: March:  $\mu\text{L}$ , pH 7,3; Forchheim: IS, pH 5,4). Im ersten Jahr nach der Biokohleausbringung wurde die mikrobielle Biomasse gefördert – in March und Forchheim durch Pyrolyse-Kohle, in March auch durch HTC-Kohle. Am Standort Forchheim wurden besonders die Pyrolysekohle-Varianten mit Kompost und Gärrest (VG 9 bzw. 10) gefördert, vermutlich durch die Anhebung des pH-Werts (um 0,1 bis 0,5) in Aggregaten des Oberbodens und das höhere Angebot abbaubarer organischer Substanz über die Zusätze. Die Aktivität der **Dehydrogenase**, Indikatorenzym für allgemeine Stoffwechselintensität und ökotoxikologische

Wirkungen im Boden, wurde an beiden Standorten durch HTC-Kohle angeregt, in Forchheim sogar über die allgemeine Förderung der mikrobiellen Biomasse hinaus. Die Kohleeffekte schwächten sich im zweiten Jahr (2013) ab. Die **Xylanase**, die eine Rolle beim Abbau von Hemicellulose pflanzlicher Zellwände spielt, wird durch leicht verfügbaren organischen Kohlenstoff angeregt. Sie reagierte eher auf die angebaute Kultur. Ein spezifischer Kohleeffekt war nicht festzustellen. Die alkalische Phosphomonoesterase („**Phosphatase**“) reagiert auf höhere pH-Werte positiv, auf die mikrobielle Biomasse korrespondierend zu deren Gehalt, auf organisch gebundenes Phosphat positiv und auf anorganisches Phosphat negativ (z.B. bei Mineraldünger). Insofern ist ihre starke Reaktion bei den Kompostvarianten (ob mit oder ohne Kohle und verstärkt bei pyro-Kohle aufgrund des pH-Werts) plausibel. Die Varianten, in denen Biokohle mitsiliert bzw. mitkompostiert wurden (V11-14, March), zeigten ähnliche Muster wie oben beschrieben. Die Sondervarianten mit längerer Co-Kompostierung von Pyrolysekohle vor der Ausbringung in Forchheim wiesen nach einem Jahr darauf hin, dass die mikrobielle Biomasse durch den gemeinsamen Kompostierungsprozess gefördert wird. **Fazit:** Sowohl HTC-, als auch pyro-Kohle hatten in den ausgebrachten Mengen keine schädlichen Auswirkungen auf das mikrobielle Bodenleben (zumindest nicht auf die untersuchten Parameter).

Über die ursprüngliche Planung hinausgehend wurde die **Reaktion von Regenwürmern im Feld beobachtet**. Aufnahmen der Häufigkeit von Regenwurmlosungen spiegelten im ersten Versuchsjahr eine negative Reaktion auf den Kohleauftrag wieder, insbesondere bei pur aufgetragenen Kohlen (Rückgang auf 50 %). Ein ebenso starker Rückgang war allerdings auch in der „Gärrest pur Variante“ zu verzeichnen (TS-Gehalt der Gärreste 80%). In den beiden Folgejahren war die negative Reaktion abgeschwächt und erreichte am Ende das Niveau unbehandelter Kontrollflächen. Interessanterweise wiesen Parzellen mit gleichzeitiger Aufbringung von Kohlen und Gärrest bzw. Kompost meist bessere Werte auf, als pure Gärrest- und Kompostvarianten. Dies war vor allem bei pyro-Kohlen auffällig. Über alle Varianten hinweg reagierten beide Standorte sehr ähnlich, was eine gute Ergebniskonsistenz beweist. Die Gesamtbeobachtung ist wichtig, da bei länger anhaltender, verminderter Regenwurmaktivität mit Folgen für die Durchmischung des Bodens zu rechnen wäre. Bei längerfristig negativer Wirkung auf Regenwürmer werden sogar Ertragseinbußen prognostiziert (**Ref. 10**).

## **II 1.F. Abbau des org. Kohlenstoffs und CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>O Emissionen** (Zuordnung LTZ\_10).

Es wurden wie geplant Labor-Inkubationsversuche mit March-Boden und Kohlen durchgeführt (HTC-BT, HTC-GR, pyro-GR bzw. flüssiger Gärrest). Der Vorgang der Mineralisierung der verschiedenen Biokohletypen zeigte hierbei stark unterschiedliche Abbaugeschwindigkeiten des Kohle-Kohlenstoffs (bestätigt durch eine Wiederholung des Gesamtversuchs). Das mit den Labormessungen angepasste Modell legt die Erwartung nahe, dass der natürlich im Boden vorhandene Kohlenstoff nach ca. 12 Jahren zur Hälfte abgebaut ist. Hierbei sei auf eine gewisse Unsicherheit solcher langfristigen Extrapolationen mittels Modellen hingewiesen, die insbesondere durch den unvermeidbaren **Schimmelbefall** bei HTC-BT weiter erhöht wurde. Während HTC-BT-Kohle im Vergleich zum

natürlich im Boden vorhandenen Kohlenstoff sehr schnell abgebaut wurde (Halbwertszeit bis zu 15 – 30% der HWZ des natürlichen Bodenkohlenstoffs), befand sich HTC-GR mit einer HWZ von 50 – 100% im Bereich des natürlichen Bodenkohlenstoffs. Die pyro-GR-Kohle dagegen erreichte ein Vielfaches (200 – 500%), war also wesentlich stabiler als der Bodenkohlenstoff. Der Abbau bei pyro-Kohle und somit die Freisetzung von CO<sub>2</sub> war damit ca. 4 – 8 mal langsamer als bei HTC-Kohlen. Die N<sub>2</sub>O-Produktion/Konsumption zeigte erwartungsgemäß eine leichte Zunahme der N<sub>2</sub>O-Emissionen bei Zugabe flüssiger Gärreste. Ein Einfluss der Biokohle konnte jedoch nicht (signifikant) festgestellt werden.

Die Palette der Merkmalerfassung mit Aussagen zum Ertragsergebnis der verwendeten Kohlen sowie zur Stoffumsetzung im Boden, zur Bodenbiologie, Umweltverträglichkeit und Abbaustabilität wurde vollständig abgedeckt. Über das Vorhabenziel hinaus wurden zusätzliche Aussagen durch ergänzende Arbeiten gewonnen (z.B. Geruchsaufnahme; Ko-Verrottungsansätze; Ökotox-Test-Ergänzung); Beobachtungen zur Regenwurmaktivität im Feld erlaubten zusätzlich Aussagen zu *in situ*-Reaktionen von Bodenbewohnern auf hoher trophischer Ebene.

## II. 2. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Für die Organisation und Betreuung der Arbeiten auf den Versuchsfeldern sowie der Gefäßversuche und interner Projektaufgaben wurde ein Techniker zu 50 % eingestellt (**a: 64.524 €** geplant 75.538 €). Für die Mithilfe bei Probennahmen und Analysen von Bodenproben und Pflanzeninhaltsstoffen wurde eine Laborantenstelle besetzt (**b: 94.487 €** geplant 108.334 €). Es erfolgten jährliche Bodenprobennahmen an den Standorten „Forchheim“ und „March“ (in 15 km bzw. 120 km Entfernung zum LTZ). Für Feldkulturen und Pflanzenanzucht in 3-jährigen Gefäßexperimenten (Vegetationshalle am LTZ) und die Beschaffung und Entsorgung von Biomasse fielen Ausgaben für Transport und Materialverbrauch sowie Sonderkosten für Vortrocknung und Entsorgung an (Verbrauch insgesamt 18.921 €). Zusätzlich war die Beschaffung eines Labor-Dreschgerätes für 7.140 € nötig (**c gesamt: 26.061 €** geplant 25.000 €). Für Reisekosten samt Kostenübernahme eines Beratungsbesuchs seitens des TI wurden (**d**) **1.526 €** benötigt (geplant 2.000 €). Zur Bestimmung des mikrobiellen Abbaus der Kohlen über Gaswechselprodukte (CO<sub>2</sub>-Freisetzung) wurde die Universität Freiburg beauftragt. Zusammen mit den Kosten für eine Gasmesssonde betragen die Ausgaben (**e**) **4.500 €** (wie geplant). Für die Durchführung wurden größere Mengen Biokohlen benötigt, deren Herstellung (Pyrolyse, HTC) Kosten in Höhe von insgesamt (**f**) **10.760 €** verursachte (geplant 10.000€). Für Ökotox-Tests wurde eine Firma beauftragt (mit Ergänzungstest **g: 7.509 €** geplant 5710 €). Dioxinmessungen wurden an eine freies Labor abgegeben (**h: 1.380 €** geplant 580 €). Das Büro für Nachhaltigkeits-Projekte (Dr. C. Holweg) wurde mit Biotests und mehreren Aufgaben im Konsortium beauftragt, die aufgrund von Verlängerung und anderer Faktoren ausgedehnt wurden (**i: 93.901 €** geplant 77.975 €).

### **II. 3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit**

Grundlegende Arbeiten waren die Vorbereitung der Versuchsfelder, die Organisation und Herstellung der Biokohlen sowie die Ausbringung der Biokohlen neben variablen Zusatzkomponenten und Düngegaben sowie jährliche Bodenuntersuchungen, die Bonitur der Versuchsflächen, die Ernte und nachfolgende mengen- und qualitätsbezogene Untersuchungen. Im gleichen Turnus wurden Gefäßversuche angelegt und ausgewertet. Für das Vorhaben mussten Sande, Kompost, Gärreste, mineralische Düngemittel und Saatgut beschafft werden. Daneben waren Wildschutzzäune, Transportmittel und landtechnische Unterstützung erforderlich. Es erfolgten die notwendigen Analysen der Zusatzkomponenten (Komposte, Gärrest) und Untersuchungen der Bodenproben hinsichtlich wichtiger Inhaltstoffe, physikalischer Parameter sowie der Bodenbiologie. Für bodenbiologische Aufnahmen mit aufwändiger Enzymatik erfolgten zum Teil zusätzliche Probenahmen, die aufgrund der jahreszeitlichen Abhängigkeit nicht im Turnus der übrigen Bodenproben stattfinden konnten. Um diesbezügliche Arbeiten zu erledigen und gleichzeitig den Kontakt zu anderen Forschungsaktivitäten zu Biokohle zu pflegen (intern, extern), waren die beantragten Gelder angemessen und gerechtfertigt (**s. 2 a – d**).

Das Potential von Biokohle-Anwendungen zur C-Sequestrierung und CO<sub>2</sub>-Stabilisierung ist eine sehr häufige Fragestellung. Für die Bestimmung des mikrobiellen Abbaus der Kohlen waren die beschriebenen Messreihen nötig und der damit verbundene Kostenaufwand gerechtfertigt (**s. 2 e**). Zudem wurden die in 2011 durchgeführten Messreihen zur besseren Absicherung 2013 wiederholt (Master und BSc-Arbeiten).

Grundvoraussetzung für sämtliche Versuche waren unterschiedliche Biokohlen in ausreichender Menge. Aufgrund der innovativen Anlagentechniken und der experimentellen Situation lagen derzeit für Gärreste in beiden Anlagentypen noch keine Erfahrungen für die Produktion größerer Kohlemengen vor. Die Gärresteverkohlung bereitete für die Verkohlung durch HTC Schwierigkeiten vermutlich aufgrund des relativ hohen Ligningehalts (pers. comm. Kruse, IKFT). Für die Pyrolyse bedeutete ein erhöhter Trockengrad des Substrats Gärrest vermehrte Anstrengungen zur Vorbereitung des Materials. Schließlich Die gewählte Vortrocknungstechnik führte jedoch zu einer ungünstigen Konsistenz für die gewählte pyrolytische Verkohlungstechnik (Verklumpungen). So wurden unter Ausfallzeiten der Anlagen für andere Aufträge mehrere Karbonisierungsgänge gefahren, ohne dass eine für die geplanten Feldversuche ausreichende Masse an Biokohle aus Gärresten produziert werden konnte. Die Eigenbeteiligungen der Biokohle-Firmen von 55 % berücksichtigend waren die angesetzten Geldmittel daher gerechtfertigt bzw. waren unterschätzt (**s. 2 f**). Die Vergabe der ökotoxikologischen Untersuchungen an ein Fremdlabor führte nicht in allen geplanten Fragen/Methoden zu verwertbaren Resultaten, da nötige vertiefende Studien schnell zu unvorhergesehenen Ausgaben geführt hätten. Zusatztests wurden daher nur in begrenztem Maß fremdbeauftragt (**s. 2 g**), ein anderer Teil wurde später innerhalb einer BSC-Arbeit am IKFT

gewonnen (s. dort). Eine kleine Ausgabenerhöhung ergab sich auch für Dioxinmessungen (PCDD/F), die aufgrund neuer Informationen auf HTC-Kohlen ausgedehnt wurden (**s. 2 h**). Dr. C. Holweg war mit externen und internen Querschnittsaufgaben betraut: Organisation Biokohle, Biomassen u. Transporte; Vorbereitung, Moderation u. Nachbereitung von acht Verbundpartnertreffen sowie Vermittlung sachkundiger Berater und Experten (TI, JKI) zu speziellen Fragen; Fotodokumentation Feldversuche, Pflege interner Datenbank; Input aus und für Fachtreffen (SAG-Treffen Nachwachsende Rohstoffe BMELV, Leipzig DBFZ 2011, Biokohletagung Campus Birkenfeld 2013), Vernetzung und Info-Weiterleitung vor Berichtsphasen. Des Weiteren eigene Forschungsbeiträge (Biotests, Regenwurmtests und Ergänzung mit Feldbeobachtungen von Regenwürmern). Durch Probleme bei der Biokohleherstellung hatte sich ein unerwartet hohes Arbeitsvolumen ergeben, dadurch entstand erhöhter Kommunikationsbedarf, s. Diskussion der Verwendung von Biertreber als Ersatz für Gärrest bei HTC; s. Verlängerungsantrag und Zusatzarbeiten aufgrund des Produktionsausfalls von Kohle; daneben vermehrter eigener Aufwand und Ausgaben für notwendig gewordene Test-Wiederholungen. Die Selbstkosten gingen dadurch weit über die geplante Eigenleistung von 55 % hinaus, sodass das LTZ auch aufgrund der mehrmonatigen Verlängerung der Projektlaufzeit einen Ausgleich ermöglichte (**s. 2 i**).

#### **II. 4. Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans**

Zum heutigen Zeitpunkt können noch nicht alle positiven wie negativen Auswirkungen einer Zufuhr von Biokohle beschrieben werden, jedoch lässt sich feststellen, dass förderliche Eigenschaften eher auf leichteren („schwächeren“) Standorten zu beobachten sein werden. 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. Aus diesem Grund wurde eine Fortsetzung der Beobachtung von Humusbildung für drei weitere Jahre angeschlossen.

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.

„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. Wichtig für alle Landwirte und Anwender von Biokohle ist die Information, dass durch die Verwendung von Pyrolyse- oder HTC-Kohlen mit Ausbringungsmengen von 20 t/ha<sup>-1</sup> keine negativen Auswirkungen für die Bodenmikrobiologie zu erwarten sind. Die Bodenmikroorganismen reagieren auf das zusätzliche Angebot an organischem Kohlenstoff, Stickstoff oder auf die Anhebung des Boden-pH-Werts mit einer Steigerung der Biomasse und bei HTC-Kohle mit einer Erhöhung der allgemeinen Stoffwechselaktivität. Die Effekte schwächen sich nach dem ersten Jahr wieder ab. Die Beobachtungen zur Bodenmikrobiologie können besonders für den ökologischen Landbau wichtig sein, der mehr als die konventionelle Landwirtschaft auf die Stoffumsätze im Boden angewiesen ist. Eine weitere wichtige Beobachtung zur Frage der Reaktion des Bodenlebens ist, dass der anfängliche Rückzug von Regenwürmern (insbesondere in Folge feucht aufgetragener HTC-Kohle), nach 7 bis 12 Monaten nach dem Kohleauftrag verschwunden war.

Eine Beobachtung, die kohärent aus mehreren Untersuchungsebenen hervorging, ist die der Synergiewirkung zwischen HTC-Kohlen und insbesondere pyro-Kohlen und Komposten oder anderen organischen Zusätzen. Wenn Kohlen mit organischen Substraten (z.B. Grünschnitt) ko-kompostiert wurden, gab es positive Wirkungen nicht nur hinsichtlich bodenbiologischer Effekte, sondern umgekehrt auch Vorteile für die Geruchsbildung bei Komposten. Die Geruchsminderung durch Kohle könnte auch in anderer Hinsicht einen gesellschaftlichen Nutzen für die landwirtschaftliche Praxis darstellen (Stichwort Gülleausbringung).

Auch um die Erosionsanfälligkeit von Kohlepartikeln zu verringern und eine bessere Partikelhaftung und -verteilung im Boden zu erreichen, wären Methoden wie Ko-Verrottung (= Rotte von organischem Material in Gegenwart von Biokohle) einer getrennten Aufbringung der Komponenten vorzuziehen.

## **II. 5. Aufstellung des während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritts auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen**

Die vorteilhafte **Anwendungspraxis von Biokohle in Kombination mit Kompost** wird auch von anderen Stellen berichtet. In einem Beitrag im Rahmen einer Tagung zum ökologischen Landbau schließen die Autoren (Reents und Levin 2013), dass positive Wachstumseffekte durch pyro-Kohle vor allem dann erwartet werden können, wenn ihr Einbringen zusammen mit Kompost oder anderen N-Quellen erfolgt. Wachstumsfördernd waren unterschiedliche Biokohle-Kompost-Mischungen vor allem dann, wenn der organische Dünger noch nicht zu sehr umgesetzt war und der behandelte Boden einen nur geringen Humusgehalt hatte. Organisches Material habe gleichzeitig den Vorteil, Kohle-Partikel zu binden und Verwehungen zu vermeiden.

Für Pyro-Kohlen, aber auch für HTC-Kohlen wurde auf die Notwendigkeit einer angepassten N-Quelle hingewiesen (Bargmann et al. 2013a). Anhand von Gefäßversuchen wurde außerdem gezeigt, dass



HTC-Kohlen die pflanzliche N-Aufnahme störten, je weiter ihr C : N Verhältnis war (Bargmann et al. 201a3).

Bezüglich der Anwendungsmenge wurden für pyro-Kohle-Gaben unter  $3 \text{ t ha}^{-1}$  (als ko-kompostierte Gabe) keine Wachstumsveränderungen gegenüber reinem Kompost beobachtet (kurzzeitiges Glashausexperiment, Schulz-Dunst-Glaser 2014). Allerdings wird in anderen Studien auf Langzeiteffekte aufgrund von Bio-Aktivierung mit Verbesserung boden-biologischer Faktoren (Mikroben, Pilze) hingewiesen (Ding et al. 2011, Nguyen et al. 2010, Cheng et al. 2005).

Für die getesteten Kohletypen (pyro; HTC) waren grundsätzlich abweichende **Materialeigenschaften** gefunden worden. Dies deckt sich mit vielen anderen Studien. Bei hoher innerer Oberfläche (bei pyro-Kohle meist höher als bei HTC-Kohlen) steigt die Adsorption (von Mineralstoffen (Schimmelpfennig and Glaser 2012; Fuertes et al., 2010; Libra et al., 2011). In dieser Richtung ist auch die oft beobachtete, erhöhte Wasserhaltekapazität des Bodens nach Anwendung von pyro-Kohle zu deuten (Reents und Levin 2013). Dies wurde in der vorliegenden Studie nicht beobachtet, wohl aber eine Verringerung der Lagerungsdichte.

**Feldversuche** mit Biokohlen über mehrere Jahre hinweg sind bislang selten und decken sich nicht immer mit Beobachtungen aus Gefäßversuchen. Nach einer 3-Jahres **Feldstudie mit pyro-Kohlen** wurden Ergebnisse veröffentlicht, die für pyro-Kohle die Nivellierung einiger zunächst veränderter Boden-Parameter im Laufe der Versuchsdauer belegte (pH, Adsorption von Ionen) (Jones et al. 2011). Pyro-Kohle (zu 0, 25 and  $50 \text{ t TM ha}^{-1}$ ) hatte am Ende weder einen Effekt auf die Abbauraten organischen Materials noch auf die Freisetzung von  $\text{NH}_3$ , die Aufnahme von  $\text{NH}_4^+$  oder die Denitrifikation. Gleichzeitig wurde eine gut entwickelte Besiedlung der Kohlen durch Mikroorganismen beobachtet. Im Biomasse-zuwachs zeigte Gras einen signifikanten Anstieg im zweiten und dritten Jahr nach der Anwendung. Mais wurde nur für 1 Jahr kultiviert und hatte keinen Zuwachs. In einer Studie von 2010 (Baronti et al. 2010) bei Feldexperimenten in Italien nach Anwendung von  $10 \text{ t TM ha}^{-1}$  pyro-Kohle Erntezuwächse (Kornträge) von 10 % für Hartweizen und 6 % für Mais beobachtet. Bei **Feldversuchen mit HTC-Kohlen** (sehr wenige bislang vorhanden) kam das Institut für Zuckerrübenforschung in Göttingen zum Ergebnis, dass zum Zeitpunkt 0,5 Jahre bzw. ein Jahr nach Aufbringung von  $10 \text{ t TM HTC-Kohle ha}^{-1}$  eine erhöhte Feldkapazität vorlag (Gajic 2012). Dies wurde als Vorteil für die Wasserversorgung in niederschlagsarmen Perioden angesehen. Die ebenso festgestellte verringerte Luftkapazität könne allerdings zu ungünstigen, anaeroben Bedingungen führen (vgl. Drainageproblem in Mini-Gefäßen während Pflanzenwachstumstests in der vorliegenden Studie). Wenn keine Ausgleichs-düngung erfolgte (Gajic 2012), kam es kurz nach der Aufbringung von HTC-Kohlen zu einer N-Fixierung (und damit Konkurrenz für das Pflanzenwachstum). Ein weiterer Ausgleich bzw. eine verbesserte Nährstoffsituation für die Pflanzen würde laut Einschätzung der Autoren im Laufe der Zeit mit eintretender Mykorrhizierung erfolgen. Als Fazit wurde daher auf eine „terminlich und standortsbezogen optimierte Anwendung“ hingewiesen (Gajic 2012). In einer anderen Feldstudie wurde für pyro-Kohle nach zwei Vegetationsperioden (Grasland, 2011-2012) eine

Veränderung in der Artenzusammensetzung beobachtet, während das Wachstum bei HTC-Kohle reduziert war (Schimmelpfennig et al. 2014).

Die Ergebnisse bezüglich des **Klimaschutzes bzw. der Minimierung von Treibhausgasen** aus landwirtschaftlichen Böden weichen allgemein voneinander ab. Eine Metastudie, die 311 Biokohle-Studien der letzten 3 Jahre betrachtete (Gurwick et al. 2013, review), betont die weiten Spannen verschiedener Parameter. So wurde die Biokohle-Stabilität von pyro-Kohle *in situ* beispielsweise auf 8 bis 4000 Jahre geschätzt. Ähnlich zur vorliegenden Studie wurden in aktuellen Arbeiten der Universitäten Bochum und Jena Abbauraten für HTC-Kohlen und pyro-Kohlen bestimmt. In Übereinstimmung mit den vorliegenden Ergebnissen war für HTC-Kohlen gegenüber pyro-Kohlen eine viel schnellere Veratmungsrate feststellbar. 16 % bis 18 % der HTC-Kohle waren nach 8 Wochen mineralisiert, bei pyro-Kohle nur 1,4 % bis 3 % (Bamminger et al. 2014). HTC-Kohle stimulierte außerdem den Abbau nicht löslicher organischer Bestandteile (SOC) in hohem Maß, während zwischen pyro-Kohle und der Kontrolle kaum Unterschiede im SOC-Abbau waren. Ein Feldversuch zeigte, dass der C-Anteil der HTC-Kohle nach einem Jahr im Boden um 12 % abgebaut war, sodass die mittlere Verweildauer auf 5 - 8 Jahre geschätzt wurde (Gajic 2012). In einer neueren Studie - basierend auf Gefäßversuchen - wurde darüber hinaus gezeigt, dass im Fall von HTC-Kohlen die mikrobielle N-Immobilisierung hauptverantwortlich für den Rückgang des leicht verfügbaren Stickstoffgehalts im Boden ist, während die Reaktion auf pyro-Kohlen viel schwächer ausfällt (Bargmann et al. 2014). In einem 1,5-jährigen Feldversuch in Kombination mit Laborversuchen war die allgemeine Beobachtung die, dass pyro-Kohlen hinsichtlich der Frage der C-Sequestrierung und der Reduktion von Treibhausgasen besser abschneiden als HTC-Kohlen (Schimmelpfennig et al. 2014). In allen Studien wird auf die Notwendigkeit systematisch angelegter Feldstudien und auf Langzeitbeobachtungen hingewiesen, um die Mechanismen ausgehend von Biokohle besser verstehen zu können.

**Forschungsinteressen hinsichtlich Biokohle-Bodenanwendungen in anderen Ländern.** Im Rahmen einer Biokohle-Tagung deutscher und chinesischer Wissenschaftler (Umwelt-campus Birkenfeld 2013) wurde das hohe Interesse Chinas deutlich, historischen Bodenbelastungen mit Hilfe von Biokohle entgegenzuwirken, um so die Voraussetzungen für die Pflanzenproduktion möglicherweise wieder herzustellen. Es wurden Ergebnisse präsentiert, die hinsichtlich einiger Schwermetallbelastungen auf eine Bodenverbesserung hindeuteten (Forschungspraxis vorwiegend mit pyro-Kohle, vereinzelt auch HTC-Kohle). Für Bodenverunreinigungen mit PAK wurde eine Abbaubeschleunigung aufgrund angeregter bzw. verstärkter mikrobieller Aktivität berichtet (Xu-Xiang ZHANG 2006). In Deutschland stellte sich bei einer groß angelegten Untersuchung alter Köhler- und Kohlehaldenstandorte heraus, dass sich die „Steigerung der Sorption und Festlegung von Schadstoffen und phytotoxischen Stoffen positiv auf die land- und forstwirtschaftliche Nutzung auswirkt“ (Fachbeitrag des LUGV Brandenburg, Heft 137, 2014).

## II 6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 6

- 2011 Posterbeitrag (Holweg, Kruse, Mokry; Biokohle-Tagung Universität Halle, 9/2011): Short Term Effects of Differently Carbonized Biomass on Important Soil Properties: Worm Activity and Plant Growth: *Ergebnisse aus Biotests (Pflanzenwachstum, Regenwurm-vermeidung) mit Belegen, dass HTC-Kohlen in frischem und feuchtem Zustand eine negativere Wirkung auf Pflanzen bzw. Regenwürmer haben als getrocknete oder gealterte HTC-Kohlen (unveröffentlicht).*
- 2012 Bericht mit online-Veröffentlichung zur Reaktion von Regenwürmern im Feldversuch (Bodenbiologie-Workshop der DBG am 20./21.9.2012, Holweg): [http://eprints.dbges.de/851/2/DBG\\_Beitrug\\_online\\_Publikation\\_23.10.12.pdf](http://eprints.dbges.de/851/2/DBG_Beitrug_online_Publikation_23.10.12.pdf).
- 2013 Bericht des LTZ Augustenberg zum Einsatz von Biokohle in der Landwirtschaft (Mokry, Aichele, Beyer, Landinfo 4/2013): [http://www.landwirtschaft-bw.info/pb/MLR.LEL.Lde/Startseite/Bildung+und+Beratung/Landinfo+Heft+4\\_2013](http://www.landwirtschaft-bw.info/pb/MLR.LEL.Lde/Startseite/Bildung+und+Beratung/Landinfo+Heft+4_2013).
- 2013 Beteiligung des LTZ an der Beantwortung einer Landtagsanfrage an das Ministerium Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg zum Thema Biokohle (Drucksache 15/4290, 11/2013): [http://www9.landtag-bw.de/WP15/Drucksachen/4000/15\\_4290\\_d.pdf](http://www9.landtag-bw.de/WP15/Drucksachen/4000/15_4290_d.pdf).
- 2013 BWagrar Kohle für den Acker. Wirkung von Biokohle auf das Pflanzenwachstum (47/2013, Mokry; Diagramme zu Pflanzenertrag und Nmin): [http://www.bwagrar.de/Kohle-fuer-den-Acker\\_L0INR19aT09NP0ZJRD00MDg3MTI3JkFJRD00MDg3MDk4Jk1JRD01MTY0NA.html](http://www.bwagrar.de/Kohle-fuer-den-Acker_L0INR19aT09NP0ZJRD00MDg3MTI3JkFJRD00MDg3MDk4Jk1JRD01MTY0NA.html).
- 2014: Mokry, Aichele, Michels, Breuer: Einsatz von „Biokohle“ in der Landwirtschaft (Zwischenergebnisse eines BLE-Drittittelprojektes). VDLUFA-Schriftenreihe 69 (Kongressband 2013), S. 289-299. VDLUFA-Verlag, Darmstadt

Weitere Veröffentlichungen in Planung: VDLUFA-Kongressband 2014, Landinfo (zur Bodenbiologie).

## **IMPRESSUM**

Herausgeber:  
Landwirtschaftliches Technologiezentrum  
Augustenberg (LTZ)  
Neßlerstr. 25  
76227 Karlsruhe

Tel.: 0721 / 9468-0  
Fax: 0721 / 9468-209  
eMail: [poststelle@ltz.bwl.de](mailto:poststelle@ltz.bwl.de)  
Internet: [www.ltz-augustenberg.de](http://www.ltz-augustenberg.de)

Bearbeitung und Redaktion:  
LTZ Augustenberg -  
Dr. Markus Mokry  
Ref. Ökologischer Landbau und Agrarökologie

Stand: Oktober 2014