



1. Einleitung

Hintergrund

Die exponentiell ansteigende Weltbevölkerung und die damit verbundenen Ernährungs- bzw. Konsumanforderungen führen zu zunehmend umfangreichen Veränderungen der Landnutzung. In vielen Ländern der Welt sind dies Intensivierung wie auch Nutzungsaufgabe, Nähr- und Schadstoffeinträge sowie eine direkte Zerstörung von Lebensräumen. Durch zum Beispiel Überweidung, Entwaldung, Übernutzung der Vegetation sowie landwirtschaftliche und industrielle Aktivitäten kommt es zu einer beschleunigten Degradation des Bodens, wodurch die ökologisch-agronomischen Bodenfunktionen (Struktur und Stabilität des Bodens, Wasserrückhaltevermögen, Nährstoffspeicherung, -pufferung und -umsatz, biologische Aktivität) bzw. die Bodenfruchtbarkeit negativ beeinflusst werden. Um den steigenden Lebensmittelbedarf in Zukunft sichern und die Bodenfruchtbarkeit erhalten zu können, bedarf es weltweit einer produktiven aber auch nachhaltigen Landbewirtschaftung.

Das Bestreben vieler Industriestaaten liegt darin, unabhängiger von den fossilen und damit endlichen Energieträgern zu werden und gleichzeitig den Kohlenstoffdioxid-Ausstoß zu senken und damit den Klimawandel zu vermindern. Hierzu hat die Europäische Union im Rahmen der Klimaschutz- und Energiepolitik bis 2020 folgende Hauptziele definiert: Senkung der Treibhausgasemissionen, Steigerung der Nutzung erneuerbarer Energiequellen (Wind, Sonne, Biomasse usw.), und Senkung des Energieverbrauches durch Verbesserung der Energieeffizienz (RICHTLINIE 2009/28/EG). Als Konsequenz hat die Biomassenutzung für die Energieerzeugung in den letzten Jahren besonders in Deutschland in starkem Maße zugenommen (Abb. 1). Die verwendete Biomasse setzt sich sowohl aus Energiepflanzen, also Pflanzen, die speziell für die energetische Nutzung angebaut werden (Mais, Raps, Zuckerrüben), als auch aus landwirtschaftlichen Reststoffen (Stroh, Ernterückstände, tierische Abfälle) zusammen. Gegenüber der Nutzung von Energiepflanzen, bietet die Nutzung von Reststoffen den Vorteil, dass keine zusätzlichen Anbauflächen benötigt werden und damit keine Konkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion auftritt.

Die im Ackerbau eingesetzten Kulturen und damit verbundenen pflanzenbaulichen Maßnahmen nehmen auch Einfluss auf den Humushaushalt des Bodens: Der Abbau von Humus wird durch den Anbau humuszehrender Fruchtarten (Kartoffeln, Silomais, Zuckerrüben), insbesondere aber durch die Abfuhr von Ernterückständen (Stroh, Rübenblatt, Kartoffelkraut) begünstigt. Ein Absinken des Humusgehaltes wirkt sich negativ auf mehrere der oben genannten Bodenfunktionen aus.

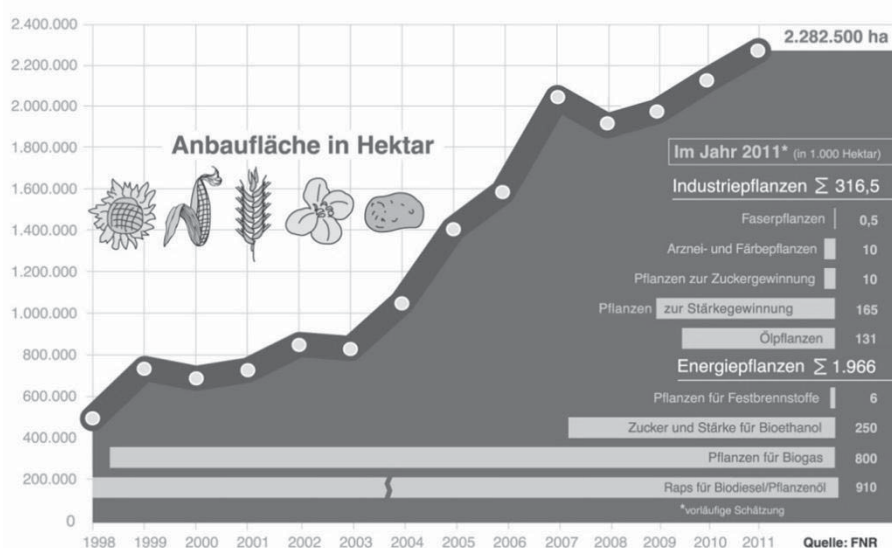


Abb. 1. Anbau nachwachsender Rohstoffe in Deutschland (FNR, 2011)

Mittel- und langfristig kann dadurch auch die Anfälligkeit des Bodens gegenüber Erosion, Verdichtung, Versalzung, Nährstoffmangel und Austrocknung steigen. Ohne einen angemessenen Humusersatz gerät die Biomassenutzung somit in Widerspruch zur guten fachlichen Praxis der landwirtschaftlichen Bodennutzung (BBODSCHG 1998, § 17). Eine ausgeglichene Humusbilanz kann durch entsprechende standortangepasste Bodenbearbeitungssysteme, Begrünungsmaßnahmen mit Zwischenfrüchten und Untersaaten und insbesondere eine hinreichende Zufuhr von organischen Materialien durch Rückführung von Ernterückständen oder der Zufuhr von Wirtschaftsdüngern (Gülle, Kompost, Festmist) bzw. Gärrückständen und Erzeugnissen aus Klärschlamm erreicht werden.

Bleibt dies aus den aufgezeigten Gründen aus, müssen alternative Möglichkeiten zur Vermeidung des Humusabbaus gefunden werden.

In Deutschland fallen jährlich rund 100 Millionen (Mio.) Tonnen Trockenmasse (TM) pflanzlicher Rest- und Abfallstoffe (Bioabfälle) an: Diese stammen aus der Land- (59 Mio. t TM) und Forstwirtschaft (31 Mio. t TM), der Lebensmittelindustrie (2 Mio. t TM), der Biotop- und Landschaftspflege (3 Mio. t TM) und den Kommunen (2 Mio. t TM) (SCHUCHARDT und VORLOP, 2010). Sie können als Futtermittel in der Tierhaltung, als nachwachsende Rohstoffe für die Energieerzeugung, oder eben zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Kohlenstoffsequestrierung verwendet werden. Trotz des großen Biomasseanfalls in Deutschland besteht auf dem Markt zwischen den verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten dieser Bioabfälle eine teilweise starke Nutzungskonkurrenz.



Die Energie aus Bioabfällen wird üblicherweise durch Verbrennung, Vergasung oder Vergärung erzeugt. Dadurch wird nur soviel Kohlenstoff freigesetzt, wie die Pflanzen vorher während der Photosynthese aufgenommen haben; daher gilt Bioabfall beim Umwandlungsprozess als „CO₂-neutral“. Für die Verbrennung ist die Trocknung der Bioabfälle wichtige Voraussetzung. Dies ist üblicherweise für besonders wasserhaltige Bioabfälle nicht energieeffizient. Für Bioabfälle mit geringer Methan- bzw. Gasausbeute fällt in der Regel auch die Verwertung über Vergärung weg, so dass dafür häufig nur die Kompostierung bleibt. Kompost könnte zu einem ausgeglichenen Humushaushalt beitragen. Dennoch birgt die Kompostierung Nachteile: Der weitaus überwiegende Teil des in dem Bioabfall gebundenen Kohlenstoffs wird während der Kompostierung durch Mikroorganismen schnell zu Kohlenstoffdioxid (CO₂) umgewandelt. Dieser Kohlenstoff geht der Kohlenstoffsequestrierung bzw. dem Humusaufbau verloren.

Um das gesamte Biomassepotenzial vernünftig in Bezug auf gesellschaftliche, politische und ökologische Anforderungen zu nutzen, sollten alternative Umwandlungsverfahren der Biomasse/Bioabfälle entwickelt werden. Eine Möglichkeit könnte die Hydrothermale Carbonisierung sein.

Hydrothermale Carbonisierung

Bei dem exothermen Prozess der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC) handelt es sich um eine wässrige Verkohlung von organischen bzw. pflanzlichen Ausgangsmaterialien, die bei erhöhter Temperatur (180–250 °C) und entsprechend erhöhtem Druck innerhalb von 4–12 Stunden abläuft (TITIRICI et al., 2007). Prinzipiell ist die HTC vergleichbar mit dem natürlichen Inkohlungsprozess von organischem Material (NEUBAUER und BEHRENDT, 2007). Der Prozess der Inkohlung kann mit diesem Verfahren von mehrere Millionen Jahre auf wenige Stunden reduziert werden und einen klimaneutralen Brennstoff erzeugen. Da die Konversion bei der HTC in wässrigem Milieu stattfindet, können die Ausgangsmaterialien einen hohen Wassergehalt aufweisen. Damit bietet das HTC-Verfahren einen wesentlichen Vorteil im Vergleich zur Pyrolyse, welche ein ähnliches Verfahren zur Herstellung von Biokohle darstellt, aber ausschließlich ausreichend trockene Biomasse nutzen kann.

Nach Ablauf der HTC-Reaktion entsteht eine Suspension mit meist verteilten Kolloidpartikeln (HTC-Biokohle), die bezüglich ihrer elementaren Zusammensetzung und ihres Brennwertes als braunkohleähnlich einzuordnen sind (Abb. 2). Der Begriff HTC-Biokohle bezieht sich auf (i) das Verfahren der Hydrothermalen Carbonisierung, (ii) das Ausgangsmaterial, das aus allen denkbaren organischen Materialien besteht und (iii) das Festprodukt, welches kohleartig ist.

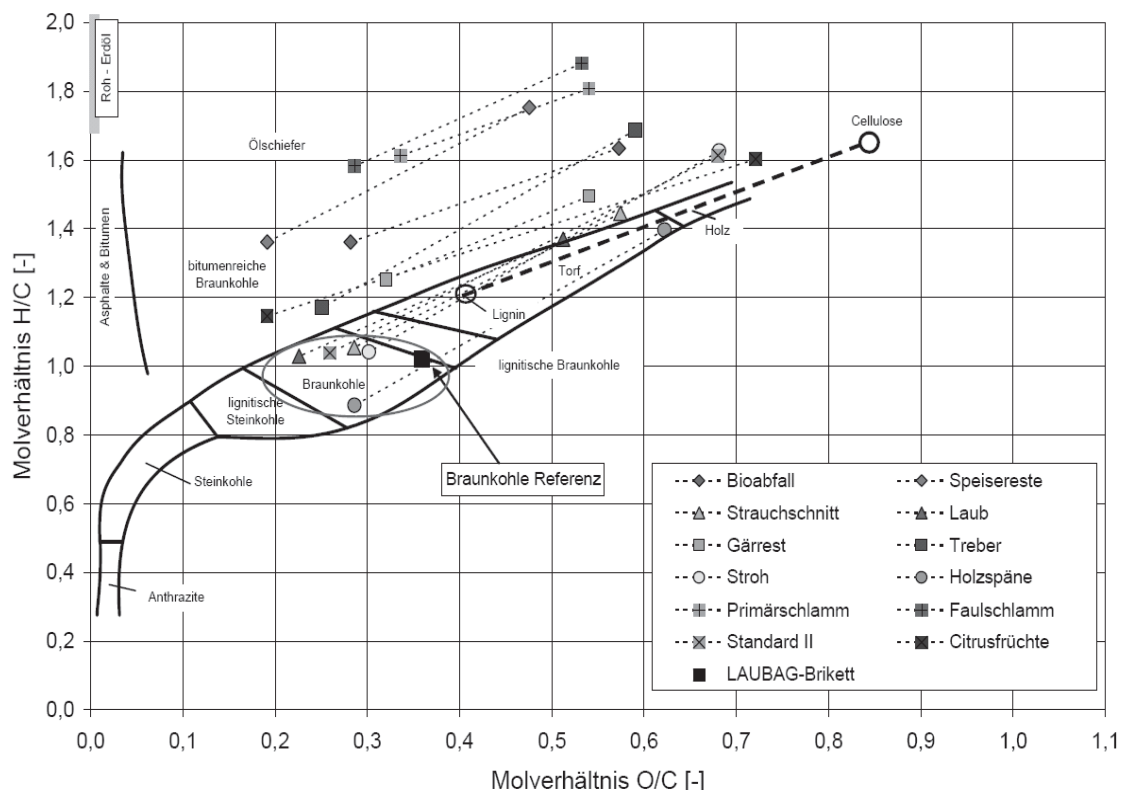


Abb. 2. Vergleichbarkeit von HTC-Biokohle aus verschiedenen Ausgangsmaterialien mit natürlich entstandenen Stoffen mittels Inkohlungsdiagramm (Van-Krevelen-Diagramm): Die HTC-Prozessintensität ist durch die Reaktionsstrecke, der Verbindung der Werte der Ausgangsmaterialien und der Werte der HTC-Biokohle, in Vektorform dargestellt (RAMKE und BLÖHSE, 2010).

Da die HTC über mehrere Stunden verläuft, können während der Reaktion Zwischenstoffe entstehen, die Torf oder Kompost sehr ähnlich sind (Abb. 2). Bei der Untersuchung von HTC-Biokohlen, hergestellt aus Modellstoffen wie Zellulose, Glukose und Hemizellulose sind kugelförmige Partikel im Mikrometerbereich bzw. poröse Strukturen mit großer aktiver Oberfläche beobachtet worden (SEVILLA und FUERTES, 2009; FUERTES et al., 2010; SEVILLA et al., 2011). Es wird vermutet, dass HTC-Biokohle eine erhöhte Stabilität gegen mikrobiellen Abbau aufweisen könnte (FUERTES et al., 2010; SEVILLA et al., 2011). Deswegen erwartet man, ähnlich wie bei der Ausbringung von Kompost, dass HTC-Biokohle zum Humusaufbau beitragen und die Bodeneigenschaften verbessern kann (GLASNER et al., 2011; LIBRA et al., 2011).

Betrachtet man die Kohlenstoffeffizienz des Kompostierungs- und HTC-Verfahrens, so wird berichtet, dass die Ausbeute des mit den Bioabfällen zugeführten Kohlenstoffes bei der HTC 90–100 % beträgt, wohingegen beim Kompostieren nur 20–25 % des vorhandenen Kohlenstoffes im Endprodukt gebunden bleiben (BRANDT, 2009). Somit könnte die HTC als Umwandlungsprozess von Bioabfällen zu einer Reduzierung der Treibhausgasemissionen, sowie zur Kohlenstoffsequestrierung durch Einbringen von HTC-Biokohle in Böden beitragen (LIBRA et al.,



2011; GLASNER et al., 2011). Allerdings ist bisher nicht bekannt, mit welchem Ausgangsmaterial und welcher Prozessführung eine für die Bodenverbesserung optimierte HTC-Biokohle hergestellt werden kann.

Die Hydrothermale Carbonisierung bietet ein erhebliches Potenzial, einen umweltfreundlichen Stoff zur Erhaltung des Humusgehaltes und somit der Bodenfruchtbarkeit von landwirtschaftlich genutzten Flächen zu erzeugen.

Zielsetzung

Im Rahmen des durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt geförderten Verbundprojektes „Rezyklierung organischer Abfälle nach hydrothormaler Carbonisierung (HTC) auf landwirtschaftlichen Flächen zur Bodenverbesserung und C-Sequestrierung“ (Abb. 3), war es Ziel dieser Arbeit, die Wirkung unterschiedlicher HTC-Biokohlen auf chemische und physikalische Bodeneigenschaften sowie das Pflanzenwachstum auf typischen deutschen Ackerböden zu quantifizieren und so zu einer Bewertung der Eignung von HTC-Biokohle für die ackerbauliche Anwendung beizutragen.

Zusätzlich wurde betrachtet, wie sich aus verschiedenen Ausgangsmaterialien und durch variierte Prozessführung hergestellte HTC-Biokohletypen in ihrer Wirkung auf oben angegebene ackerbaulich bedeutsame Kenngrößen unterscheiden.

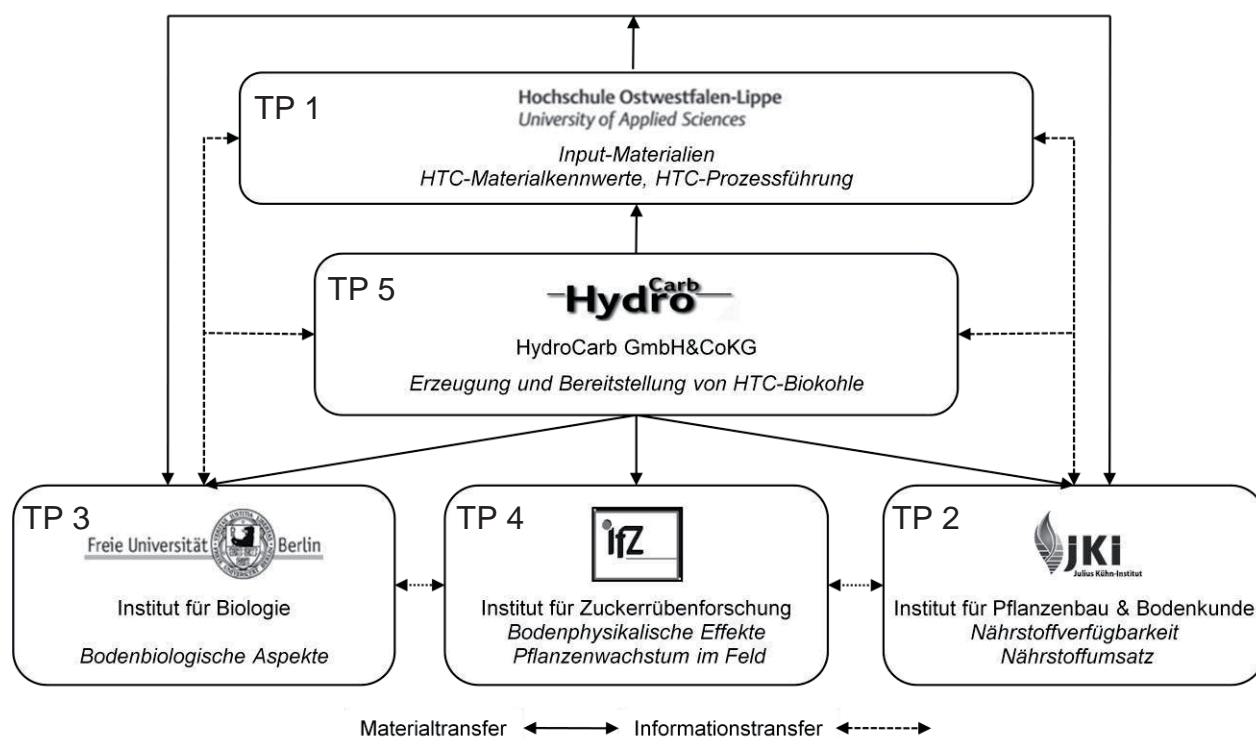


Abb. 3. Struktur des Verbundprojektes (TP = Teilprojekt)



Zur HTC-Biokohle-Herstellung wurden die Ausgangsmaterialien Rübenschnitzel (RS) und Birtreber (BT) aufgrund ihrer Homogenität und Verfügbarkeit als Modell-Lignozellulose-Stoffe ausgewählt.

Bemerkungen zur Durchführung der Studie und Belastbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen des Teilprojektes „Bodenphysikalische Effekte und Pflanzenwachstum im Feld“ innerhalb des Verbundprojektes waren Feldversuche mit Zuckerrüben als Prüffrucht ursprünglich an zwei Standorten (Braunerde, Braunschweig; Parabraunerde, Göttingen) und in zwei Vegetationsjahren (2010; 2011) als Untersuchungsbasis vorgesehen. Ein erster Vorversuch mit Sommergerste als Prüffrucht sollte zur Abschätzung der Wirkung von HTC-Biokohle in der Nähe von Göttingen im Frühjahr 2009 angelegt werden. Für beide Feldversuche war eine Anwendung von unterschiedlich hergestellten HTC-Biokohlen (10 t TM ha^{-1}) sowie eine mehrfach gestufte Stickstoffdüngung zur Prüfung einer möglichen N-Immobilisation geplant. Die Effekte sollten vergleichend zu einer unbehandelten Kontroll- sowie einer Kompostvariante quantitativ sowie qualitativ betrachtet werden.

Aufgrund technisch und organisatorisch bedingter Verzögerungen bei der Herstellung der HTC-Biokohle, konnte der für Anfang 2009 vorgesehene Vorversuch erst im Herbst 2009 mit Winterweizen und mit nur einer HTC-Biokohlevariante in einer Menge von $7,5 \text{ t TM ha}^{-1}$ durchgeführt werden. Darüber hinaus konnte in der Vegetationszeit 2010 nur einer von zwei geplanten Feldversuchen in erheblich eingeschränktem Umfang und mit einem nicht üblichen Ausbringungstermin der HTC-Biokohle, nämlich im Frühjahr des Vegetationsjahres statt im Herbst des Vorjahres, angelegt und durchgeführt werden. Im April 2010 wurde deshalb nur der Feldversuch in der Nähe von Göttingen angelegt. Zwar konnte die Ausbringungsmenge der HTC-Biokohle bzw. des Komposts bei 10 t TM ha^{-1} wie vorgesehen erreicht werden, allerdings war dies nur durch eine Reduzierung der Anwendungsfläche möglich, was zu einem eingeschränkten Untersuchungsumfang führte. So betrug die Parzellengröße (HTC-Biokohle x Stickstoffstufe) bei den Varianten Kompost und Kontrolle 100 % ($56,7 \text{ m}^2$), HTC RS_{4/190} 80 %, HTC RS_{12/190} 60 %, HTC BT_{12/190} 50 %. Bei Anwendung auf der Versuchsfläche wurde die HTC-Biokohle bzw. der Kompost in frischem Zustand gleichmäßig oberflächlich verteilt, jedoch war eine Einarbeitung zu diesem Zeitpunkt nicht möglich, da die HTC-Biokohle einen hohen Wassergehalt aufwies (Abb. 4a). Um eine Verschleppung der HTC-Biokohle mit den eingesetzten Maschinen zu vermeiden, wurde die Einarbeitung verzögert. Nach 10-tägiger Lufttrocknung des Materials kam es zur Ausbildung von Klumpen, welche vor der Einarbeitung manuell nicht zerkleinert wurden und

dadurch eine heterogene Verteilung der HTC-Biokohle im Boden verursachten (Abb. 4b). Daraus resultierend kam es zu einer sehr heterogenen Entwicklung der Zuckerrübenpflanzen auf den HTC-Biokohleparzellen innerhalb einer Stickstoffstufe (Abb. 4c).

In Ermangelung ausreichender HTC-Biokohle-Mengen musste auf die geplante HTC-Ausbringung in zweiten Versuchsjahr verzichtet werden. Durch den Ausfall des zweiten Versuchsjahres und des zweiten Standortes und somit relevanter zweijähriger bzw. zweiortiger Datensätze, wurde eine Umstellung des Arbeitsschwerpunktes von den Feldversuchen auf Labor- und Gewächshausversuche vorgenommen.

Bei der Untersuchung des Effektes von HTC-Biokohle auf das Pflanzenwachstum wurden zahlreiche Gewächshausversuche mit verschiedenen Pflanzenarten (Zuckerrüben, Sommergerste) und unterschiedlichen Böden (Sand, Löss) angelegt. Eine homogene Verteilung der Kohlepartikel bzw. gleichmäßiges Pflanzenwachstum innerhalb der 1-kg-Gefäße wurde durch die Trocknung (105 °C) und Vermahlung der HTC-Biokohle ($\leq 0,5$ mm) vor der Einmischung erreicht.

Ergänzend zum Feldversuch (Abb. 5a) wurden zur Betrachtung der Abbaustabilität von unterschiedlich hergestellten HTC-Biokohlen und Referenzmaterialien (Fertigkompost, Weizenstroh, Weißtorf, pyrogene Biokohle) zwei Labor-Mikrokosmos-Versuche angelegt. Im ersten Mikrokosmos-Versuch wurden ähnliche Messgefäße (Weißblecheimer) wie im Feld eingesetzt. Die aus diesem Versuch hervorgegangenen Ergebnisse mussten verworfen werden, da das Verhältnis zwischen Boden- und verfügbarem Luft- bzw. Sauerstoffvolumen nicht optimal angepasst war. Deswegen wurde ein weiterer Mikrokosmos-Versuch durchgeführt (Abb. 5b). Zusätzlich konnte hier ein für die Abbauintensität möglicherweise limitierender Effekt, nämlich N-Mangel ausgeschlossen werden: Für HTC-Biokohlevarianten mit den höchsten erwarteten Abbauraten wurden zusätzliche Varianten mit durch N-Zugabe ausgeglichenem C/N-Verhältnis (äquivalent zur Kontrollvariante) angelegt. Da sowohl aus den Varianten mit als auch ohne angepasstem C/N-Verhältnis gleiche Kohlenstoffdioxidmengen freigesetzt wurden, kann davon ausgegangen werden, dass keine N-Limitierung der Umsetzungsprozesse vorlag.

Ein weiterer Aspekt der Untersuchung war, die Effekte von HTC-Biokohle auf bodenphysikalische Eigenschaften zu quantifizieren. Da im Feldversuch (Abb. 5c) kein Effekt, weder durch HTC-Biokohle- noch durch Kompostzufuhr (Ausbringungsmenge 10 t TM ha^{-1}) auftrat, bestand eine große Herausforderung darin, das Wasserhaltevermögen unter Laborbedingungen mit höheren Anwendungsmengen (äquivalent zu $30\text{--}60 \text{ t TM ha}^{-1}$) zu untersuchen. In einem ersten Versuch wurde die Trocknung und Vermahlung der HTC-Biokohle vor der Einmischung durchgeführt und

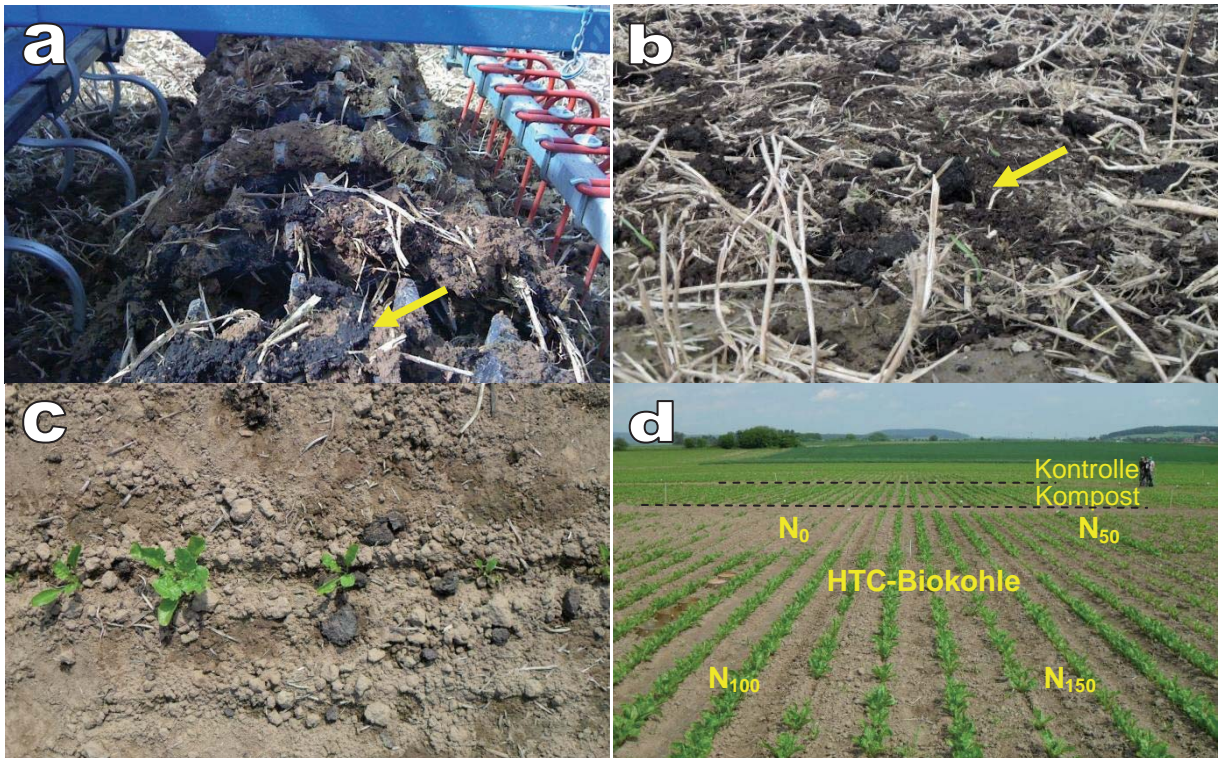


Abb. 4. Anwendung von HTC-Biokohle (10 t TM ha^{-1}) im Feld (Hevensen, 2010): a) Verklebung der HTC-Biokohle, b) Formierung der HTC-Klumpen während der Lufttrocknung, c) heterogene Entwicklung der Zuckerrüben innerhalb der N_0 Stufe der HTC-Biokohlevariante, d) Entwicklung der Zuckerrüben innerhalb der HTC-Biokohlevariante



Abb. 5. Messung der Kohlenstoff-Freisetzung mittels Natronlauge-Methode (a, b) bzw. Bodenprobenahme mittels Stechzylinder für die Bestimmung der Wasserhaltekapazität (c, d) unter Feld- und Laborbedingungen



die Stechzylinder wurden mit der Mischung (Boden und HTC-Biokohle) auf eine gezielte Trockenrohdichte manuell eingefüllt.

Dadurch kam es zu einer nicht repräsentativen Beurteilung des Effektes auf die Wasserhaltekapazität der Böden unter Feldbedingungen: (i) in der Regel wird die Trockenrohdichte durch die Zufuhr von organischen Materialien gesenkt, (ii) durch die Vermahlung der HTC-Biokohle wird die Porengrößenverteilung der Böden beeinflusst. Um diese Problematik zu umgehen, wurde ein Verfahren zur quasi-in-situ Erfassung der Wasserhaltekapazität entwickelt (Abb. 5d).

Im Rahmen des Verbundprojektes waren drei Teilprojekte (TP 2, TP 3, TP 4) von der verspäteten Lieferung und dem Mangel an HTC-Biokohle für die anwendungsbezogene Forschung stark betroffen. Aufgrund des unterschiedlichen Beginns der Forschungsaktivitäten der im Projekt verbundenen Teilprojekte, kam es teilweise zu Überschneidungen von Forschungsschwerpunkten: Die fortschreitenden Teilprojekte konnten die Erkenntnisse anderer Teilprojekte nicht rechtzeitig als Ergänzung bzw. Unterstützung der eigenen Ergebnisse nutzen, sondern mussten selber in deren Forschungsschwerpunkte eingreifen. Insgesamt haben wir versucht, trotz der nicht immer einfachen Situation, das Beste daraus zu machen, um zeitnah qualitative Aussagen in Bezug auf die vordefinierten Ziele treffen zu können.

Aufbau der Arbeit

Die behandelten Aspekte und Fragestellungen im Zusammenhang mit einer ackerbaulichen Anwendung von HTC-Biokohle werden nachfolgend in Form von vier Artikeln vorgestellt.

Der erste Artikel „HTC-Biokohle als Bodenverbesserer – Erste Ergebnisse aus einem Feldversuch mit Zuckerrüben“ wurde in der Zeitschrift „Zuckerindustrie“ veröffentlicht. Hierbei wurden erste Erfahrungen mit der Anwendung von HTC-Biokohle im Vergleich zu Kompost auf einem typischen deutschen Ackerbaustandort dargestellt. Es wurde erwartet, dass die Anwendung von HTC-Biokohle vergleichbar positive Effekte wie die Kompostausbringung auf das Zuckerrübenwachstum hat und dies durch die Verbesserung der Bodeneigenschaften bedingt war.

Im zweiten Artikel „Sugar Beet (*Beta vulgaris* L.) Growth reduction caused by hydrochar is related to nitrogen supply“ veröffentlicht im „Journal of Environmental Quality“, erfolgte eine detaillierte Betrachtung von Ursachen der frühen Wachstumshemmung der Zuckerrübe durch HTC-Biokohle. Diesmal wurden neben weiteren Ergebnissen aus dem Feldversuch auch Ergebnisse eines ergänzenden Gewächshausversuches berücksichtigt. Hypothese war, dass die Anwendung von HTC-



Einleitung

Biokohle das Jugendwachstum von Zuckerrüben vor allem durch eine veränderte Pflanzenverfügbarkeit von Stickstoff, vermutlich infolge mikrobiell bedingter Immobilisierung und Remineralisierung, beeinflusste.

Der dritte Artikel „Microcosm study on the decomposability of hydrochars in a Cambisol“, wurde bei der Zeitschrift „Biomass and Bioenergy“ veröffentlicht. Gegenstand dieses Artikels war die Untersuchung des Effektes der Prozessführung bei der Herstellung von HTC-Biokohle auf ihre Abbaustabilität in sandigem Boden. In Bezug auf diese Versuchsfrage wurde davon ausgegangen, dass eine erhöhte Temperatur und längere Dauer der Carbonisierung zu zunehmender Stabilität der HTC-Biokohle im Boden führt.

Der vierte Artikel „Wirkung von HTC-Biokohle auf physikalische Bodeneigenschaften, CO₂-Freisetzung und Pflanzenwachstum“ wurde als Tagungsbeitrag in „Initiativen zum Umweltschutz“ der Deutschen Bundesstiftung Umwelt publiziert. Im Mittelpunkt dieses Artikels stand die Frage, wie eine Anwendung von HTC-Biokohle in praxisrelevanter Menge (10–60 t TM ha⁻¹) chemische und physikalische Eigenschaften von Löss- und Sandböden beeinflusst. Hypothese war hier, dass HTC-Biokohle positive Effekte auf die Eigenschaften des Bodens hat und, dass diese Effekte abhängig von der Anwendungsmenge sowie der Prozessführung der HTC-Biokohle sind.

Den Artikeln folgt eine Zusammenfassung aktueller Forschungsergebnisse, mit dem Ziel, Möglichkeiten und Grenzen der ackerbaulichen Anwendung von HTC-Biokohle aufzuzeigen.