

Biokohle: Ein Weg zur dauerhaften Kohlenstoff-Sequestrierung?

1. Was ist "Biokohle"?

Im letzten Jahr wurde in den Medien häufiger über "Biokohle" berichtet, entweder als ein Mittel zur Bodenverbesserung, als CO_2 -neutraler Brennstoff biologischen Ursprungs oder auch als Werkzeug im Kampf gegen den Klimawandel. Begriffe wie "Biokohle", "*biochar*", "Terra preta" oder "hydrothermale Karbonisierung" werden oft (fälschlicherweise) synonym benutzt, da es noch keine allgemein gültigen Definitionen für den deutschen Sprachraum gibt. Im Folgenden dient "Biokohle" als Oberbegriff für zwei verschiedene, aus Biomasse hergestellte Produkte: (1) "*Biochar*" (auf deutsch etwa "Biotricks") für Produkte aus **Pyrolyse** (Verschmelzung) oberhalb von ca. 350 °C; dieser Begriff hat sich bereits international für die Holzkohle-ähnlichen Produkte der Pyrolyse eingebürgert. (2) "HTC-Biokohle" für die Produkte der **Hydrothermalen Karbonisierung** (kurz HTC, vom engl. *hydrothermal carbonization*). Diese wird unter hohen Drücken (~ 20 bar) und Temperaturen um die 200 °C hergestellt, ebenfalls aus verschiedensten C-haltigen Reststoffen. Sie ähnelt in Struktur, Heizwert und Farbe Braunkohle oder Torf.

Beide Prozesse besitzen ein großes Potential zur nachhaltigen, CO_2 -neutralen bis CO_2 -negativen Energieerzeugung aus Biomasse, da die Biomasse via Photosynthese zuvor das CO_2 aus der Atmosphäre entnommen hat. Der Transport von Brennstoffen mit höherem Brennwert ist zudem wesentlich " CO_2 -günstiger" und kosteneffizienter als der von feuchter Biomasse mit geringerem Heizwert.

Wenn ein Teil der erzeugten *Biokohle* in Böden eingebracht und dort nicht, oder nur sehr langsam, abgebaut würde, dann kann die Energieerzeugung über Biokohle als " CO_2 -negativ" betrachtet werden, da ein entsprechender Teil des Atmosphären- CO_2 's dauerhaft der Atmosphäre entzogen wäre. Die CO_2 -Sequestrierung von flüssig abgeschiedenem CO_2 bei der Verbrennung *fossiler* Energieträger könnte lediglich " CO_2 -neutral" sein. Der Atmosphäre könnte dadurch kein CO_2 entzogen werden.

2. Die Geschichte der "Terra preta"

Die Idee, aus Biomasse hergestellte Kohle zur Bodenverbesserung einzusetzen, stammt aus der noch jungen Erforschung der Amazonas-Schwarzerde-Böden, genannt "Terra preta". Diese Böden finden sich in "Flecken" von meist 1 - 20 ha vor allem entlang der großen Flusssysteme Brasiliens, z.B. des Rio Negro oder des Amazonas. Im Gegensatz zu den typischen Oxisol-Böden sind sie sehr fruchtbar, nährstoff- und humusreich, weisen höhere pH-Werte sowie eine verbesserte Wasserspeicherfähigkeit (Wasserkapazität) auf und ermöglichen mehrere Ernten im Jahr ohne Düngung (Abb. 1). Lange Zeit war unklar, ob diese Böden natürlich entstanden oder anthropogenen Ursprungs sind.



Abb. 1: Links: typischer Oxisol; rechts: Terra preta (© B. Glaser)

Im Jahre 1542 bereiste der spanische Konquistador Francesco de Orellana das Gebiet des heutigen Amazonas auf der Suche nach Gold und Reichtümern ("El Dorado"). Er berichtete von hoch entwickelten, bevölkerungsreichen indianischen Stadtstaaten entlang des Amazonas; Schätzungen nach seinen Schilderungen belaufen sich auf bis zu 20 Millionen Menschen. Nur wenige Jahrzehnte später nachfolgende "Entdecker" und Missionare fanden diese Menschen jedoch nicht mehr vor, und somit galt de Orellana fortan als ein früherer Baron Münchhausen. Heute nimmt man an, dass die

ersten Europäer Seuchen einschleppten, die zum Zusammenbruch der indigenen Kulturen führten.

Die systematische Erforschung der Terra preta-Böden begann in den 1960er Jahren v.a. durch den niederländischen Bodenwissenschaftler Wim Sombroek. Dieser hatte als Kind den "Hungerwinter" 1944 dank eines gut gepflegten Stücks Gartenland überlebt ("Plaggen-Erde"). Dieser Kulturboden auf ursprünglich nährstoffarmen Sanden war über Generationen durch Anreicherung mit organischer Substanz und Verbrennungsresten aus dem Herd fruchtbar gemacht worden. Er vermutete daher rasch einen menschlichen Ursprung der Terra preta Amazoniens und regte ab 1966 mit seiner Buchveröffentlichung *"Amazon Soils"* die wissenschaftliche Erforschung der Terra preta-Böden an. Ende der 1990er Jahre gelang es dem Bayreuther Bodenkundler Bruno Glaser, den wesentlichen "Zutaten" der Terra preta-Fruchtbarkeit auf die Spur zu kommen: vor allem Holzkohle, aber auch Siedlungsabfälle wie Fischgräten, Knochen, Exkrementen, Tonscherben und sogar ganze Tongefäße fanden sich in den bis mehrere Meter mächtigen Böden – ein klares Indiz für menschliches Entstehen und Quelle der erhöhten Nährstoffgehalte. Das Alter der meisten ^{14}C -datierten Kohlepartikel betrug im Mittel 1000 bis 2000 Jahre; sogar bis zu 7000 Jahre alte Terra preta wurde bereits beschrieben. Nur eine sesshafte Kultur mit Ackerbau (wofür die zahlreichen Terra preta-Vorkommen Zeugnis ablegen) stellt Tongefäße her und baut Straßensysteme, wie sie mittlerweile gefunden werden. Somit müssen die Schilderungen de Orellanas zumindest teilweise auf Fakten beruhen – eine Rehabilitation nach über 450 Jahren.

3. Biokohle und C-Sequestrierung

Sollten sich die Biokohlen in Böden als zersetzungsstabil erweisen, würde dadurch der Atmosphäre CO_2 entzogen und langfristig gespeichert, d.h. sequestriert. Bei einer Teilnutzung der Biokohlen zur Energieerzeugung wäre dieser Prozess dann " CO_2 -negativ": Beim Aufwuchs der Biomasse würde der Atmosphäre via Photosynthese mehr CO_2 entzogen als durch Verbrennung zur Energieerzeugung wieder hinein gelangt. Theoretisch wäre es auch möglich, eine definierte Menge Biokohle an anderen Orten zu sequestrieren (z.B. in Bergwerksstollen); der Kohlenstoff wäre dann ebenfalls der Atmosphäre entzogen. Eine nachhaltige CO_2 -neutrale Energie- und Rohstoffherzeugung (Bsp. Bioöle) aus Biomasse ist bereits ohne "Biokohle in Böden" sinnvoll. Dabei würde man aber auf weitere

positive Aspekte, z.B. ökonomischen Nutzen in der Landwirtschaft oder Nutzen für den Klimaschutz verzichten.

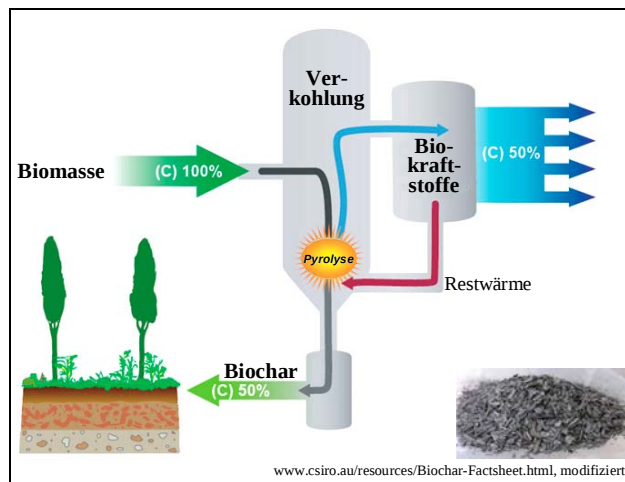


Abb. 2: Schema der C-Sequestrierung mittels Pyrolyse-Biochar: Etwa die Hälfte des Kohlenstoffs der Biomasse wird in Form von Biochar ausgekoppelt und in Böden eingebracht; die anderen 50% werden energetisch oder stofflich genutzt (Syngase oder Bioöle). Denkbar ist auch eine am Markt orientierte Nutzung des Biochars: je nach Marktlage als (CO_2 -neutraler) Brennstoff oder als Bodenverbessernder, C-speichernder Bodenhilfsstoff. (Quelle: CSIRO, Australien)

4. Biokohle in Böden: Sinn oder Unsinn?

Ob und in welchem Maße in Böden Biokohle eingebracht werden sollte bzw. dürfte, hängt von folgenden Faktoren ab:

(1) Es darf keine Risiken oder schädliche "Nebenwirkungen" geben, die dagegen sprechen; einmal in Böden eingebrachte Schadstoffe verbleiben dort für lange Zeit. In der bislang publizierten Literatur überwiegen positive Effekte (siehe 5).

(2) Es muss wirtschaftlich und gesellschaftlich positive Effekte geben, die einen Mehr-Wert schaffen, der für die Einbringung in Böden spricht und z.B. gegen die Einlagerung in Bergwerken oder gegen die reine Verbrennung, z.B. als Öl-Ersatz.

Der Einsatz von Biokohlen in Böden kann folgende positive Effekte haben: eine Ertragssteigerung, höhere Ertragsstabilität bei klimatischen Extremereignissen, eine verbesserte Nährstoff-Nutzungseffizienz, C-Sequestrierung und Verringerung der Treibhausgas-Emissionen aus Böden. Die Chancen liegen dabei auf mehreren Ebenen – wirtschaftlich (Biokohle-Produktions-Techniken) für ein führendes Technologie-Land wie Deutschland, landwirtschaftlich für Länder mit stark degradierten Böden und für das gemeinsame Ziel aller, den Klimaschutz. Daher sind das Potential und die Rahmenbedingungen dieser Chance dringend näher zu erforschen.

5. Biokohle in Böden: Stand des Wissens

Vier Funktionen kann Biokohle theoretisch abdecken: (1) effiziente energetische Nutzung von Biomasse, (2) Bodenverbesserung (Ertragssteigerung, Nährstoff- und Wassernutzungs-Effizienz) und (3) C-Sequestrierung in Böden sowie (4) Verminderung von Treibhausgas-Emissionen aus der Landwirtschaft. Derzeit klaffen noch sehr große Lücken in unserem Wissen um die Punkte (2) und (3). Zu (4), der Verminderung v.a. der N_2O -Emissionen aus Böden, existieren einige wenige Studien mit Biochar, die eine solche Minderung zeigen; das Funktionsprinzip ist jedoch noch nicht verstanden.

Die meisten Studien und Experimente zur Wirkung in Böden wurden an Terra preta-Böden, mit Biochar oder mit Holzkohle durchgeführt, während es zur HTC-Biokohle noch so gut wie keine Publikationen gibt. Ein Grund dafür ist, dass das HTC-Verfahren, ursprünglich bereits 1913 von Friedrich Bergius zum Patent angemeldet, erst jüngst in Deutschland "wiederentdeckt" und technisch weiterentwickelt wurde. Somit stammen die meisten Ergebnisse zur Wirkung in Böden aus der noch jungen Terra preta- und Biochar-Forschung.

Zu den zahlreichen **offenen Fragen** im Bereich der **Bodenverbesserung** (2) gehören folgende: Welche Böden können durch Biokohle-Einsatz verbessert werden – eher sandige, tonige, humusarme oder humusreiche? Bei welchen Bodenarten zeigt sich kein oder evtl. sogar ein negativer Effekt? Welche Arten von Biokohle (Ausgangsmaterialien, Produktionsprozess, Prozessbedingungen) haben welche Effekte in Böden? Welche chemischen und physikalischen Eigenschaften besitzen die verschiedenen Biokohlen, und welche Wirkungsweise können wir aufgrund des (noch geringen) Wissens um ihre Eigenschaften voraussagen? Unser Verständnis der Wirkungsmechanismen von Biokohlen aufgrund ihrer Eigenschaften ist noch völlig unzureichend.

Bei Biochar können drei Wirkungsprinzipien positive, Ertrag steigernde und Boden verbessernde Effekte haben:

- eine verbesserte Nährstoff-Versorgung, entweder direkt (Biochar als Nährstoffträger, je nach Ausgangsmaterial) oder indirekt (pH-Wert-Steigerung; Erhöhung der Kationen-Austausch-Kapazität)
- eine verbesserte Wasserversorgung aufgrund der erhöhten Wasserkapazität von Böden mit Biokohle-Beimengung
- eine gesteigerte mikrobielle Aktivität (Nährstoff-Nachlieferung, Adsorption, Freisetzung) und Diversität (v.a. in Terra preta nachgewiesen) sowie

positive symbiotische Wechselwirkungen zwischen Mikroorganismen und Pflanzen. So wurde beispielsweise eine gesteigerte N_2 -Fixierung in Sojabohnen nachgewiesen, die auf Biochar-Böden wuchsen.

Zu allen drei Mechanismen liegen Ergebnisse aus Terra preta- und Biochar-Studien vor. Jedoch gibt es unseres Wissens noch keine Ergebnisse zu den Wirkungsmechanismen von HTC-Biokohle. Zu erwarten ist mindestens eine Verbesserung der Bodenwasserversorgung.

Selbst wenn eine Biokohle bedenkenlos auf einen Boden appliziert werden kann und dort evtl. sogar positive Wirkungen entfaltet, könnte es sein, dass die Applikation alle paar Jahre wiederholt werden muss – falls die Biokohle nicht stabil (d.h. abbauresistent) ist. Zur **C-Sequestrierung** (3), d.h. zur Langzeit- CO_2 -Speicherung in Böden, eignet sie sich *nur*, wenn sie sich jahrhundertlang in Böden erhält wie bei der Terra preta. Wenn die Zerfallsraten der eingebrachten Biokohlen abgeschätzt werden können, besteht theoretisch die Option, Biokohle als sequestrierte CO_2 -Äquivalente im Emissionshandel zu berücksichtigen.

Gerade hier türmen sich die **offenen Fragen**: Welche Art von Biokohle hält sich wie lange in welcher Bodenart, in welchem Klima und bei welcher Bewirtschaftung (Pflanzenarten, Fruchtfolge)? Wie rasch zerfällt Biokohle in kleinere Partikel und wird in den Unterboden verlagert? Führen Frier-Tau- oder Nass-Trocken-Zyklen (Hitzewellen, Starkniederschläge) zum rascheren Zerfall? Oder wird die biologische Aktivität von z.B. Pilzen und Pflanzen-Mykorrhiza stimuliert, so dass es zu einer verstärkten Boden-Aggregation und so zu einer verbesserten Abbauresistenz kommt? Oder liefert die Applikation von Biokohle anfangs labilen Kohlenstoff, mit dessen Hilfe Bodenmikroben gar den alten, bereits vorhandenen Bodenkohlenstoff angreifen und mineralisieren (*priming effect*)? Wenn es dazu in größerem Ausmaß käme, wäre wenig gewonnen. Das **Beispiel Terra preta** zeigt jedoch, dass Biokohle im Vergleich zu den nährstoffarmen typischen Urwaldböden zum Aufbau einer signifikant höheren Menge an organischer Humussubstanz geführt hat. Mit anderen Worten: Die Biokohle (Biochar) hat langfristig über einen verstärkten Humusaufbau eine *zusätzliche* CO_2 -Sequestrierung ausgelöst. Der exakte Mechanismus dieses bedeutsamen und interessanten Phänomens ist noch nicht geklärt.

6. C-Sequestrierungspotential und Risikoabschätzung der Biokohle-Nutzung

6.1. Das Biokohle-Forschungsprojekt: Arbeiten, Kontext und Ziele

In Zusammenarbeit mit dem HLUG konnte Ende 2009 am Institut für Pflanzenökologie der Justus-Liebig-Universität Gießen mit ersten Forschungsarbeiten begonnen werden. Die Arbeiten gliedern sich in kurz-, mittel- und langfristige Untersuchungen (Tabelle 1). Die kurzfristigen Untersuchungen betreffen **Tests zur möglichen biotoxischen Wirkung** verschiedener Biokohlen auf Keimung und Wachstum von Pflanzen und Verhalten von Bodentieren. Bislang existieren in der noch jungen Biokohle-Forschung keine standardisierten Testverfahren zur Unbedenklichkeitsprüfung des Einsatzes von Biokohlen in Böden¹. Wenn möglich wurden internationale Vorschriften zugrunde gelegt und zur Anwendung als Biokohletestverfahren leicht modifiziert. Durch die in Tabelle 1 neu etablierten Biotoxizitätstests kann das hessische Biokohle-Projekt einen wertvollen Beitrag zur zukünftigen Standardisierung von Testverfahren in der Biokohleforschung leisten.

Mittelfristige Untersuchungen in Labor, Gewächshaus und Feld betreffen vor allem Fragen des C-Sequestrierungspotentials und der Flüsse klimarelevanter Treibhausgase (CO_2 , N_2O , CH_4) verschiedener Biokohlen (Tabelle 1). Zu klärende Fragen sind z.B.: Führt die Karbonisierung oder Pyrolyse verschiedener Ausgangssubstrate zu einer verringerten Abbaurate bzw. zu vollständiger Stabilität der eingebrachten Biokohlen? (Vergleich der CO_2 -Abgabe zwischen Ausgangsmaterial (Edukt) und Biokohle-Produkt). Wie wirkt sich eine Biokohle-Zugabe auf die Treibhausgas-Flüsse unter verschiedenen "Extremereignissen" aus, die üblicherweise hohe THG-Emissionen auslösen (Bsp. Starkniederschläge)? Wie wirkt sich die Gegenwart von Pflanzen auf die THG-Freisetzung aus? Wenn Biokohle das Pflanzenwachstum steigert, wird dem Boden mehr Stickstoff entzogen, was zu verringerten N_2O -Emissionen führen sollte.

Langzeitstudie: Im Frühjahr 2010 erfolgt die Anlage eines Feldversuchs zum langfristigen C-Sequestrierungspotential durch Biokohle auf dem

¹ Bei einem am 10. März 2010 am GFZ in Potsdam durchgeführten Biokohle-Kolloquium zur Identifizierung offener Fragen wurde die nationale und internationale Standardisierung von Nomenklatur, Testprotokollen und Analyseverfahren in der Biokohleforschung als eine dringende Notwendigkeit eingestuft.

Gelände der Umweltbeobachtungs- und Klimafolgenforschungsstation Linden.

Zunächst laufen bis Herbst 2010 Vorarbeiten zur Charakterisierung der angelegten Flächen; im Herbst 2010 soll die erste, oberflächliche Biokohle-Applikation stattfinden, der weitere folgen sollen. Zum Einsatz gelangen zwei Biokohlen von deutschen Herstellern, eine HTC-Biokohle (Fa. Hydrocarb) und ein Biochar (Fa. Pyreg-GmbH). Es sollen Biokohlen mit der positivsten Wirkung bzw. der höchsten Abbauresistenz verwendet werden.

Es werden 12 Versuchsparzellen (je 4 x 4 m) angelegt (Behandlungen: Kontrolle, HTC-Biokohle, Biochar, jede vierfach repliziert). In jeder Parzelle soll ein Subplot angelegt werden, auf den ^{13}C -markierte Biokohle ausgebracht wird. Über dieses Vorgehen kann der "Weg" und die Verweildauer der markierten Biokohle im Bodenprofil erfasst werden. Die ^{13}C -markierte Biokohle soll aus drei starkwüchsigen Biomassepflanzen erzeugt werden, die in den CSTR (Continuous Stirred Tank Reactors)-Kammern des Instituts für Pflanzenökologie zuvor angezogen und markiert werden (Pappeln, *Miscanthus* und *Polygonum x igniscum*). Über den kommenden Sommer soll soviel Biomasse wie möglich so stark wie möglich ^{13}C -markiert und anschließend von den kooperierenden Biokohle-Firmen karbonisiert bzw. pyrolysiert werden.

6.2. Erste vorläufige Ergebnisse

In ersten, vorläufigen Biotoxizitätstests zeigten sich sowohl positive als auch negative Effekte verschiedener Biokohlen. Im **Kressetest** (Freisetzung phytotoxischer Gase) besaß keine der getesteten, zuvor bei 105°C getrockneten Biokohlen eine negative Wirkung (Abb. 4). *Frische* HTC-Rübenschnitzel-Biokohle dagegen wirkte so stark phytotoxisch, dass die Kressesamen zwar quollen, aber nicht keimten oder wuchsen (Abb. 3). Warum ein solcher Unterschied zwischen der gealterten getrockneten und der frischen HTC-Biokohle besteht, ist noch unklar.

Der **Salatkeimungstest** zeigte bei einigen Biochars und der Holzkohle keinen oder einen leicht positiven Effekt auf das Keimverhalten von *Lactuca sativa*. Eine der HTC-Biokohlen bewirkte in sehr hoher Zugabe eine Hemmung der Keimung, eine andere (aus Rübenschnitzeln) wirkte bereits ab der geringsten Zumischung negativ (Abb. 5). Dies verdeutlicht, dass verschiedene Biokohlen ganz unterschiedliche Effekte haben und sich selbst bei gleichem Herstellungsverfahren unterscheiden können.

<u>I. Kurzzeituntersuchungen: Biotox-Tests</u> <i>Dauer: 48 h bis 2 Wochen</i> Prüfung auf Freisetzung phytotoxischer Gase - Keimung, Wachstum: Kresse-Test (BggK*, 7 Tage) Prüfung der Auswirkungen auf die Flora - Keimung: Salatkeimungstest (ISO-17126; Sand-Biokohlegemische, 5-7 Tage) - Keimung: Gerstenkeimungstest (BggK*; EEO-Biokohlegemische; 10 Tage) - Wachstum: Gerstenkeimungstest (wie oben) Prüfung der Auswirkungen auf die Boden-Fauna - Substratpräferenz: Regenwurmvermeidungstest (ISO-17512-1; LUFA-Standardboden 2.2; 48 h) Prüfung auf Genotoxizität Tradescantia-Kleinkern-Test (VDI 3957 Blatt 16), modifiziert: - mit wässrigen Biokohle-Auszügen - nach Wachstum in Biokohle-EE0-Mischungen Flüsse klimarelevanter Treibhausgase (THG) Boden-BK-Mischungen: CO₂, N₂O, CH₄ (Summe der CO₂-Äquivalente) - Kurzfristige Wirkung div. Faktoren (Temperatur, Feuchte, N-Applikation, Pflügen) in Gegenwart verschiedener Biokohlen auf die Spurengasflüsse	<u>II. Mittelfristige Untersuchungen</u> <i>Dauer: 3 Wochen bis 6 Monate</i> C-Sequestrierungspotential (Labor, Gew.-H.) - CO₂-Abgabe von Boden-BK-Mixturen im Vergleich zu nicht karbonisierten Edukten - Zersetzungsraten von Biokohlen (¹³C-markiert) Flüsse klimarelevanter THG (Labor, Gew.-H., Feld) - Wirkung von THG-relevanten klimatischen Störgrößen; praxisrelevante Fragen - Wirkung von Pflanzenbewuchs in BK-Beimengung
<u>III. Langfristiger Freiland-Feldversuch</u> <i>Dauer: bis 5 Jahre</i> Anlage eines Biokohle-Feldversuchs - Vierfach replizierte 4 x 4 m Parzellen mit Kontrolle, einem Biochar und einer HTC-Biokohle - Sub-Plots mit ¹³C-markierten Biokohlen Kontinuierliche Beprobung des Feldversuchs C-Sequestrierungspotential: ➤ Wöchentlich: CO₂-Flüsse ➤ Monatlich: Biokohle-Abbauraten ➤ Jährlich: Biokohle-Bewegung im Bodenprofil, veränderte Bodenaggregation THG-Flüsse: wöchentliche Messung	

Tabelle 1: Schematische Darstellung der begonnenen und geplanten Arbeiten im Biokohle-Projekt. **Links:** Kurzzeituntersuchungen zur Biotoxizität im Rahmen des Biokohle-Projekts. **Rot:** "Reine" Biokohle. **Grün:** Biokohle-Boden-Mixturen. **Rechts oben:** Mittelfristige Untersuchungen. **Rechts unten:** Langfristige Feld-Studie zum C-Sequestrierungspotential und zu Treibhausgas-(THG-)Flüssen aus Böden, zu denen Biokohle hinzugegeben wurde. Abkürzungen: BggK = nach Vorschrift der Bundesgütegemeinschaft Komposte; * = modifiziert; EEO = Einheitserde Null; Gew.-H. = Gewächshaus; BK = Biokohle (Pyrolyse, HTC); HTC = hydrothermale Karbonisierung

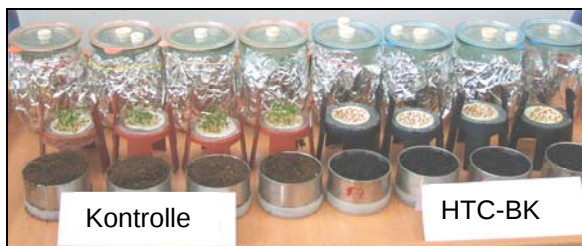


Abb. 3: Kressekeimung nach 7 Tagen; links: Kontrolle (rot, 1-4), rechts (schwarz, 5-8): abgepresste HTC-Rübenschnitzel-Biokohle

Nach der Salat-Keimung war das (ca. 3-tägige) Wachstum bei allen Biochars durch geringe bis mittlere Konzentrationsbeimengung tendenziell oder signifikant gefördert. Besonders eklatant fiel die Förderung bei der verwendeten Holzkohle aus (Buchenholz-Grillkohle aus einem Baumarkt); die Pflänzchen waren sichtbar größer und kräftiger (Abb. 6). Eine andere getestete Grillkohle aus nicht näher bezeichnetem Holz hatte nicht die gleiche Wirkung (jedoch auch keine negative Wirkung). Ein Biochar (von der US-Firma "Eprida") wirkte in hoher Konzentration hemmend gegenüber der Kontrolle mit reinem Sand (Abb. 6).

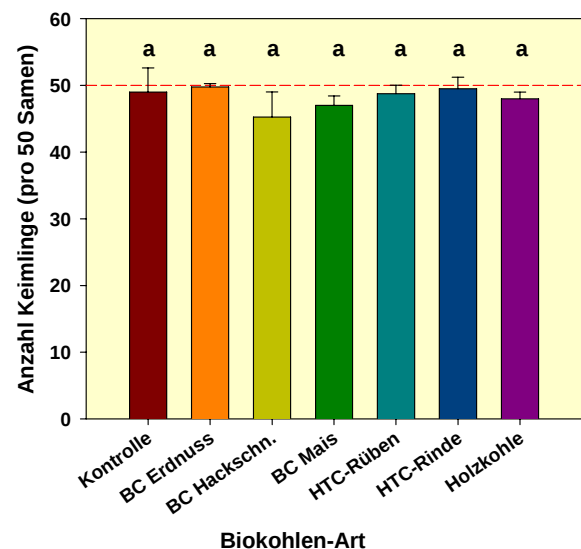


Abb. 4: Keimung von 50 Kressesamen (Mittelwerte + Standardabweichung, n = 4) in einem geschlossenen Gefäß über 250 ml einer Biokohle. Alle Biokohlen wurden zuvor bei 105°C getrocknet und dann auf 30 % ihrer maximalen Wasserkapazität eingestellt. Abkürzungen: BC = Biochar (Pyrolyse); Hackesn. = Hackschnittel-Siebreste; HTC = Biokohle aus hydrothormaler Karbonisierung; gleiche Buchstaben: kein signifikanter Unterschied (p<0,05, einfaktorielle ANOVA)

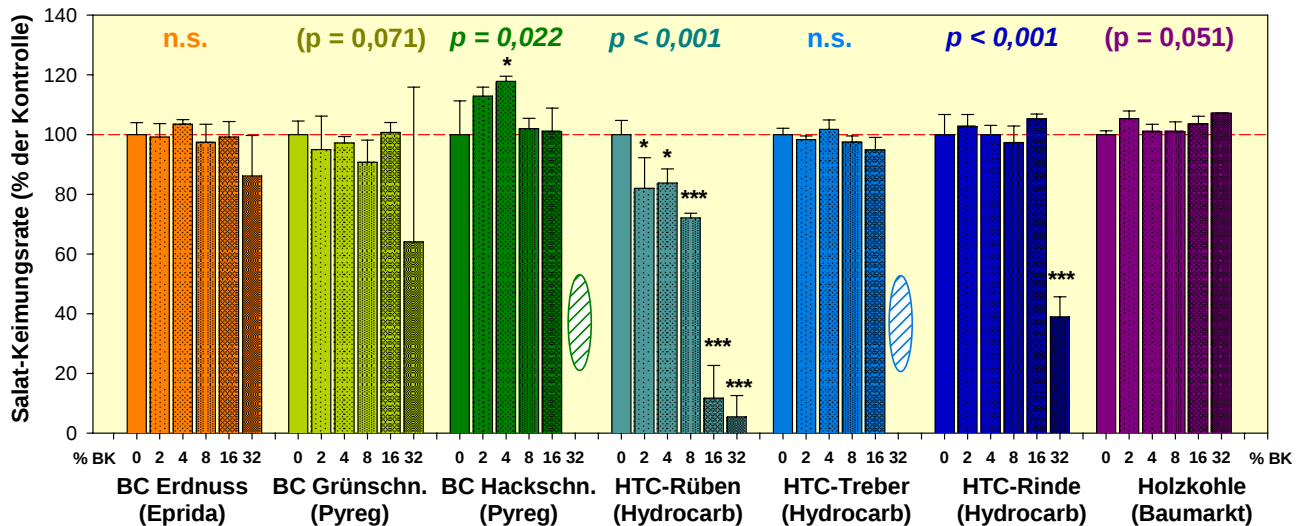


Abb. 5: Keimungsrate in Gewichts-% der Kontrolle von 40 **Salatkeimlingen** (n = 3, Mittelwerte + Standardabweichung) nach 5 Tagen Keimung auf einer Feinsand-Biokohle-Mischung mit unterschiedlich hohen Biokohle(BK)-Anteilen. Die verwendeten BK wurden zuvor bei 105 °C getrocknet und fein (< 1 mm) gemahlen und die Mischungen auf 80 % ihrer maximalen Wasserkapazität eingestellt.

Einfaktorielle ANOVA für jede BK; farbiger p-Wert: Einfluss der Biokohle (p < 0,05; n.s. = nicht signifikant); Sterne: Signifikanz der Abweichung von der jeweiligen Kontrolle an (* p < 0,05; ** p < 0,01; *** p < 0,001). Schraffierte Ovale kennzeichnen fehlende Stufen (ungenügende Menge Biokohle). HTC-Treber: Ausgangsmaterial Biertreber

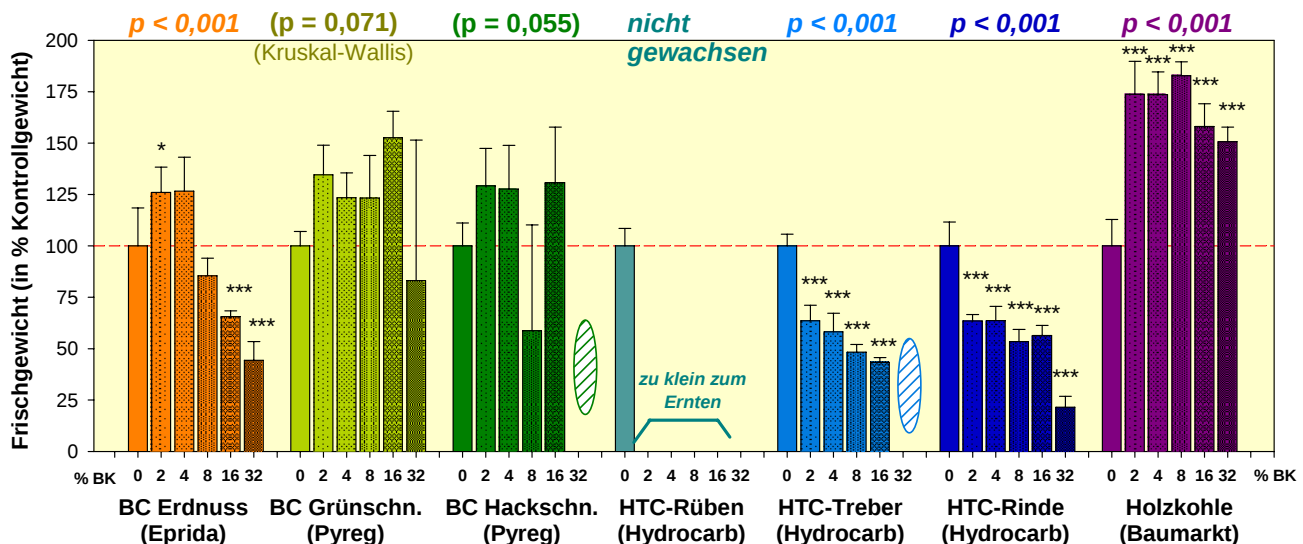


Abb. 6: Frischgewicht (oberirdisch) der 40 **Salatkeimlinge**, gleiche Darstellung und Statistik wie obige Abb. 5

Da die Keimrate nicht reduziert war, beruhte dies tatsächlich auf geringerem Wachstum. Alle HTC-Biokohlen reduzierten das Wachstum der gekeimten Pflänzchen, selbst wenn die Keimrate nicht verringert war. Bei der Rübenschnitzel-Biokohle hatten die gekeimten Pflänzchen zwar die Sanddecke durchbrochen, waren dann jedoch nicht gewachsen und hatten kein Chlorophyll gebildet. Die Ursache ist noch unklar; die HTC-Biokohlen weisen generell eher saure pH-Werte auf, die Biochars eher alkalische pH-Werte. Weitere Arbeiten zum Verständnis und zur Absicherung dieser ersten, vorläufigen Ergebnisse sind dringend notwendig.

Man beachte, dass im Gerstenkeimungs- und Wachstumstest (Abb. 7) wie auch im voran gegangenen

Salatkeimungstest in den höheren Mischungsstufen *sehr große Mengen* von Biokohle verwendet wurden, wie dies in der ackerbaulichen Praxis niemals geschehen würde². Hierdurch soll geprüft werden, ob es *überhaupt* zu negativen Effekten kommen kann oder ob diese selbst bei abnorm hohen Gaben nicht auftreten – was den Einsatz der betreffenden Biokohle wirklich unbedenklich machte.

² So entspricht z.B. eine Beimischung von 32 g pro 100 g (höchste Stufe des Salatkeimungstests) bei 20 cm Pflugtiefe einer Feldapplikation von über 1300 Tonnen Biokohle pro Hektar; realistische Werte, wie sie in Versuchen bereits benutzt wurden, liegen bei 10 bis 50 t / ha; die aufsummierten Holzkohle-Gehalte der Terra preta Amazoniens liegen bis in 1 m Tiefe bei etwa 50 t / ha.

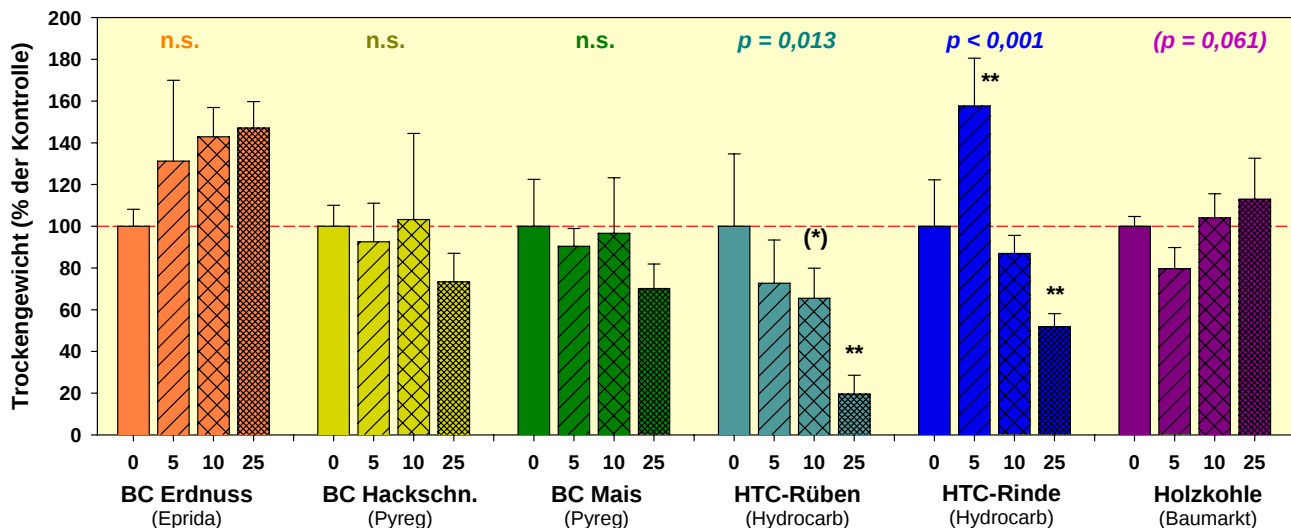


Abb. 7: Trockengewicht junger **Gerstenpflanzen nach 10 Tagen Wachstum**, in Prozent der Kontrolle (50 Samen pro Topf; Mittelwerte + Standardabweichung; n = 3). X-Achse: Mischungsstufen mit Biokohle: ungedüngte Einheitserde (eine Art Torfsubstrat) mit 5, 10 und 25 Volumen-% Biokohle. (Biokohle: bei 105 °C getrocknet; auf < 5 mm Korngröße gemahlen). Die Mischungen waren auf 70 % der maximalen Wasserkapazität eingestellt.

Einfaktorielle ANOVA pro Biokohle; farbiger p-Wert: Einfluss der Biokohle (p<0,05), Sterne: Signifikanz der Abweichung von der jeweiligen Kontrolle, vgl. Abb. 5 und 6

Gerste ist gegenüber Salat weniger salzempfindlich; zudem findet der Gerstetest in einem torfartigen Substrat (Einheitserde) statt, welches vorhandene Schadstoffe möglicherweise puffert. Daher müssen die Ergebnisse der beiden Tests nicht unbedingt übereinstimmen.

Im **Gerstetest** bewirkte das Biochar aus den USA (orange Farbe in Abb. 7) tendenziell eine erhöhte Keimungs- und Wachstumsrate mit steigender Gabe, während die deutschen Biochars bei höherer Gabe eine leicht reduzierende Wirkung hatten. Insgesamt konnte jedoch bei allen Biochars und auch bei Holzkohle keine signifikant negative Wirkung festgestellt werden. Die HTC-Biokohle aus Rübenschnittzeln verringerte bei 25 % Biokohle-Zugabe die Keimung signifikant (keine Abb.) und reduzierte zudem das Wachstum (Abb. 7). Die Pflanzen blieben klein und gelb. Die Beimischung von HTC-Rinden-Biokohle hatte in geringer Menge einen fördernden Einfluss auf Keimung und Wachstum, in der höchsten Stufe dagegen einen negativen Einfluss (Abb. 7). In weiteren Gerstetests (nicht dargestellt) bestätigten sich die oben gezeigten Testergebnisse beim Erdnusschalen-Biochar mehrfach (d.h. kein signifikanter Einfluss, tendenziell Förderung). Bei Verwendung von gealterter, fast ein Jahr trocken gelagerter HTC-Rinden-Biokohle trat auch in der höchsten Zugabestufe keine signifikante Reduktion des Keim- und Wuchsverhaltens mehr auf, wie dies bei relativ frisch produzierter HTC-Rinden-Biokohle noch der Fall war (Abb. 7). Wie schon im Kressekeimungstest auf phytotoxi-

sche Gase angedeutet, scheinen sich die Eigenschaften der HTC-Biokohlen mit längerer Lagerung zu verändern, die des Biochars – soweit bisher erkennbar – dagegen nicht. Erste Ergebnisse werfen natürlich immer neue Fragen auf. So ist zu klären, welche Ursachen manchen negativen Wirkungen zugrunde liegen; einfache Erklärungen wie ein zu hoher Salzgehalt oder zu geringer pH-Wert könnten bereits die Ursache sein und sich evtl. leicht beheben lassen.

Die ersten **Regenwurmvermeidungstests** zeigen eine leichte bis signifikante Präferenz der Tiere für verschiedene (basische) Biochars bzw. Holzkohle und eine signifikante Vermeidung der sauren HTC-Biokohlen (Abb. 9). Erfolgreiche Positivkontrollen mit Borsäure zeigen das Gelingen des Tests an.

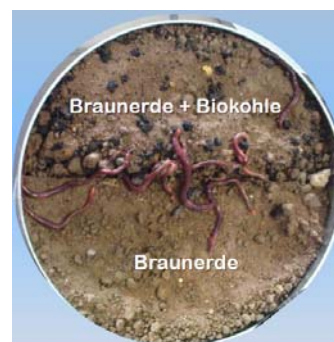


Abb. 8: Zweiteiliges Gefäß für den Regenwurmvermeidungstest bei Einsetzen der 10 Testtiere an der Substratgrenze (Kompostwürmer, *Eisenia foetida*, laut ISO-Norm). Die abgedeckten Gefäße wurden 48 h bei definierten Bedingungen im Gewächshaus aufgestellt, danach wurde die Anzahl der Tiere in der jeweiligen Substrathälfte ermittelt.

Die Messung der **Treibhausgas-Flüsse** bei sechs Biokohle-Braunerde-Mischungen über zwei Monate zeigte sehr hohe CO₂-Emissionen aus den Mischungen mit HTC-Biokohle und teils signifikante Reduktionen durch Biochars (Abb. 10).

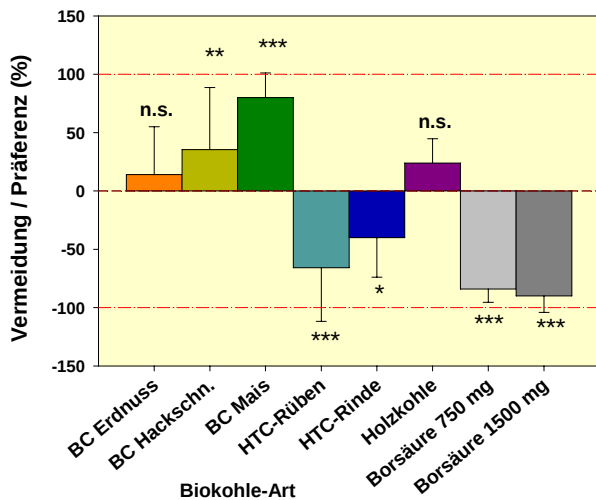


Abb. 9: Ergebnisse des **Regenwurmvermeidungstests** (n = 5 Gefäße pro Biokohle); Farben wie in Abb. 6-8; grau: Positivkontrolle durch Zugabe von Borsäure. Null-Linie: keine Präferenz bzw. Vermeidung, gleiche Anzahl Tiere auf jeder Gefäßseite. Signifikanzniveaus wie in Abb. 6

Somit sind die HTC-Biokohlen entweder (a) weniger stabil oder (b) weisen einen höheren Anteil von labilem, leicht zersetzbarem Kohlenstoff auf als die Biochars bzw. Holzkohle. Hohe bzw. reduzierte CO₂-Abgaberraten sind nicht *per se* "gut" oder "schlecht": Eine Reduktion könnte theoretisch eine mikrobielle Hemmung bedeuten. Eine hohe CO₂-Abgabe, d.h. viel mikrobielles Substrat, könnte dagegen längerfristig zum Aufbau einer aktiveren Bodenfauna und -flora führen. Solche Fragen können nur in Feldexperimenten geklärt werden.

Anfangs reduzierten alle Biokohlen die N₂O-Emissionen signifikant gegenüber der Kontrolle, trotz gleich eingestellter Wasserkapazität. Während bei den Biochars die Reduktion der N₂O-Emissionen (um bis zu 75 %) bestehen blieb, erreichte sie bei den HTC-Biokohlen nach 4 Wochen wieder das Niveau der Kontrolle bzw. ging darüber hinaus (Abb. 10). Interessanterweise emittierten alle Biokohlen direkt nach Vernässung oder Mischung mit feuchtem Boden CH₄, sehr wahrscheinlich nicht biologischen Ursprungs. Vor dem Hintergrund der anderen Treibhausgasflüsse war die CH₄-Emission aber unbedeutend (Abb. 10). Es bleibt abzuwarten, ob die Reduktion der N₂O-Emissionen auch im Feldversuch unter wechselnden klimatischen Bedingungen auftritt und über Jahre bestehen bleibt.

7. Zusammenfassung

Abschließend betrachtet zeigen die ersten Ergebnisse deutlich, dass Biokohle nicht gleich Biokohle ist. Es bestanden große Unterschiede in der Wirkungsweise – nicht nur zwischen Pyrolyse- und HTC-Biokohlen, sondern auch innerhalb einer Herstellungsart oder je nach Biokohle-Alter.

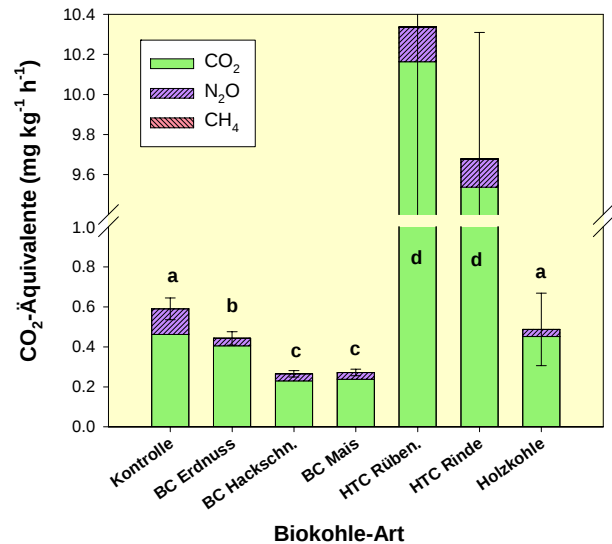


Abb. 10: Mittlere Emissionsraten aller drei Treibhausgase (CO₂, N₂O und CH₄, als CO₂-Äquivalente); Inkubation: 8 % Biokohle in Braunerde. Verschiedene Buchstaben: signifikanter Unterschied (p < 0,05)

Mit Nachdruck muss die Vorläufigkeit der gezeigten Ergebnisse betont werden. Sie lassen noch keine extrapolierbaren, belastbaren Rückschlüsse auf die Verwendung im Feld zu, und sie ersetzen auch keine längerfristigen Feldexperimente.

Einige der getesteten Biokohlen erscheinen sehr vielversprechend, was ihre Nutzung in Böden angeht – sie zeigten keine Unverträglichkeiten, dagegen aber selbst in den Kurzzeituntersuchungen eine Reihe positiver, wünschenswerter Wirkungen wie beispielsweise erhöhte Keimraten, stärkeres Wachstum, die Reduktion von N₂O-Emissionen und zudem keinerlei Indiz für einen raschen Abbau, d.h. sie scheinen prinzipiell zur C-Sequestrierung geeignet zu sein. Die nächste Stufe des Projekts, der Beginn des Feldexperiments, wird von allen Beteiligten mit Spannung erwartet; die Vorbereitungen dazu haben bereits begonnen.

Impressum

Bearbeiter: Dr. C. Kammann, Prof. Dr. L. Grünhage,
D. Busch, Prof. Ch. Müller, PhD (Uni Gießen)
G. Dörger, Prof. Dr. K. Hanewald,
Dr. Th. Schmid (HLUG),

Stand: April 2010

Herausgeber:

Hessisches Landesamt für Umwelt und Geologie
Postfach 3209, 65022 Wiesbaden

Telefon: 0611/6939-0

Telefax: 0611/6939-555

Vertrieb: Telefon: 0611/6939-111

Telefax: 0611/6939-113

E-Mail: vertrieb@hlug.de