

Verminderung von Nitratauswaschungen und Lachgasemissionen durch Biochar

Claudia Kammann^{1,2,*}

Pflanzkohle-Forschung: Warum gerade jetzt?

Im Zuge des sich beschleunigenden Klimawandels und der weltweit steigenden CO₂-Emissionen führte die Suche nach möglichen Mitigations- und Adaptationsstrategien zu einer stärkeren Wahrnehmung des Themas „Bodenkohlenstoff“. Grundsätzlich sind die Bodenkohlenstoffgehalte eines Ökosystems eine Funktion des Zusammenspiels von Bodenart, Nährstoffverfügbarkeit, langfristigem Klima und dem Kohlenstoff-Input (Bestandesabfall, Ernterückstände, Wurzelexsudate) und dem Kohlenstoff-Verlust durch Abbau und Mineralisation. (Eine hohe Bodenatmungsrate kann daher entweder das Resultat von hohen C-Inputs sein, oder das Resultat eines verstärkten Abbaus, oder von beidem – dies hängt jeweils vom Ökosystem-Zustand ab. Die Höhe der Bodenatmung sagt also nur etwas aus wenn man das Gesamtsystem kennt, ein bestimmter Wert ist nicht *per se* „gut“ oder „schlecht“.)

Die globale Erwärmung und anthropogene Eingriffe in natürliche Ökosysteme befeuern viele schnelle Rückverstärkungsmechanismen, über die weitere Treibhausgase in die Atmosphäre gelangen. Bei (zusätzlichen) Hitzewellen beispielsweise gelangen durch Wald- oder Torf-/Moorbrände (Bsp. Russland 2010[1]) innerhalb weniger Tage und Monate große Mengen CO₂ in die Atmosphäre die zuvor über Jahrhunderte fixiert und großen Reservoirs aufgebaut worden sind (Bsp. Stammholz – Wald; Torfschichten; Bodenkohlenstoff). Wenn dann z.B. in Folge eines Brandes die photosynthetische Fixierung von CO₂ über die Folgejahre und Jahrzehnte stark reduziert ist, die Abbauprozesse aber weiter laufen, verliert das betreffende Ökosystem auch nach den eigentlichen Brandverlusten weiter Bodenkohlenstoff. Der Ökophysiologie C. Körner fasste dies „Verhalten“ des biosphärischen Kohlenstoffs in der Kurzformel zusammen „*Slow in, rapid out*“ [2]. Mit voranschreitendem Klimawandel und bei wachsender Weltbevölkerung intensivieren sich diese Rückverstärkungsmechanismen.

Für mich ist das Aufkommen der Biochar-Forschung in den letzten 8 Jahren daher kein Zufall, sondern Ausdruck eines Paradigmenwechsels: Wir nehmen stärker wahr, dass wir die Erdatmosphäre nicht weiter ungestraft als kostenlose Mülldeponie unseres sozioökonomischen Energiestoffwechsels benutzen können; und dass unser Tun Folgen hat.

Biochar – ein junges Forschungsfeld mit „Januskopf“

Wie jedes junge Forschungsfeld ist auch die Pflanzkohle-Forschung voll von „Test- und Tast-Versuchen“, trial and error, und auch Ansätzen, die sich im Nachhinein als unpraktikabel oder gar unsinnig erweisen. Und wie viele „emerging fields“ wurde und wird es mit Erwartungen und Befürchtungen komplett überfrachtet. Pflanzkohle ist weder schwarzer Feenstaub, noch eine eierlegende Wollmilchsau – aber nach meiner Einschätzung eine unglaubliche facettenreiche Chance im Kampf gegen den Klimawandel, ein potentielles C-speicherndes Werkzeug, dass wir durch Forschung und Entwicklung zu formen haben. (Keine Neuentwicklung hat je anders begonnen.)

Ein Problem des Materials ist, dass es so viel Verschiedenes tun kann: Biochars können je nach Eigenschaften beispielsweise das Herbizid Glyphosat (Monsanto: Roundup) binden, wenn Biochar in größerer Menge eingebracht wurde, wie die Arbeiten einer Israelischen Gruppe zeigten[3, 4]. Ob dies nun „gut“ oder „schlecht“ ist liegt im Auge des Betrachters: Wer die Wirkung des Herbizides haben will, wird den Bindungseffekt nicht gut heißen; wer Bodensanierung mit Biochar betreiben will (z.B. bei organischen Kontaminationen) wird genau diesen Effekt suchen; und wer als Tierarzt chronischen Botulismus bei Rindern behandeln will, wird aufgrund genau dieser Eigenschaften von Biochar dieses als „carbo ligni“ medikamentiv in der Fütterung einsetzen. Daher sehe ich in den derzeitigen oft kontroversen Diskussionen das Spiegelbild der „Janusgesichtigkeit“ des Materials Pflanzenkohle.

Neben den angesprochenen Beispielen wie Sorption von Kontaminanten (wie Organika und Schwermetallen), der Amelioration von ungünstigen Bodenbedingungen (pH, Wasserhaltevermögen usw.) und gänzlich anderen Anwendungsfeldern (Bauindustrie, Papierherstellung, Tierhaltung) kreiste die Bodenbezogene Biochar-Forschung der letzten Jahre vor allem um die folgenden beiden Themenblöcke:

1. „C-Sequestrierung“, Kohlestabilität und Bodenkohlenstoff-Reservoirs: Wie stabil sind verschiedene Formen von Kohle, produziert aus verschiedenen Materialien mittels verschiedener Verfahren und Prozesse über längere Zeiträume? Führt die Einbringung von Biochar zu einem beschleunigten oder verzögerten Abbau des bereits vorhandenen Bodenkohlenstoffs (positives oder negatives „priming“)?
2. Senkung der Umweltkosten“ der Produktion landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. Dies hat zwei Seiten (a) Ertragssteigerungen (stets gewünscht, oft erwartet, selten durch pures Biochar erfüllt) und (b) Verringerung negativer landwirtschaftlicher Begleiterscheinungen, wie die Reduktion Nitratauswaschungen ins Grundwasser und die Verringerung der Emissionen des klimaschädlichen Treibhausgases Lachgas (N_2O).

Der folgende Beitrag widmet sich vor allem Punkt 2, der Reduktion der unerwünschten Umwelteffekte.

Ausgangspunkt unserer Untersuchungen war die wenig überraschende Erkenntnis, dass die Nutzung großer Mengen purer Pflanzenkohle im Schnitt nur zu moderat-positiven Ertragseffekten führt[5, 6]. Diese weisen zudem eine große Schwankungsbreite auf, so dass die Effekte schlecht vorhersagbar sind, was den Einsatz unattraktiv macht. Positive Effekte waren meist an die Verbesserung sehr ungünstiger Bodeneigenschaften durch Kohlegabe gekoppelt [7-9]. In der traditionellen Landnutzung hingegen wird seit Jahrhunderten Kohle in der Kompostierung eingesetzt (Bsp. Japan). Daher stellte sich uns die Frage, ob sich die Eigenschaften der Kohle durch Kompostierung verbessern lassen; und ob mögliche Verbesserungen an den Faktor „Nährstoffe“ gekoppelt sein würden. Diesen Fragen folgten wir mit zahlreichen Experimenten.

Material und Methoden

Die im Vortrag vorgestellten Ergebnisse stützen sich auf eine Reihe verschiedenster Studien in Gewächshäusern, Klimakammern, im Labor und im Freiland. Diese werden jeweils hier kurz vorgestellt, jedoch nicht im wissenschaftlich üblichen erschöpfenden Stil (Nachfragen bitte bei Bedarf

an C. Kammann richten); fast alle Studien nutzten Sandböden, und in allen ging es um das Thema „Veränderung von Kohle durch Kompostierung, bzw. Alterung im Boden“.

Der Auftakt war eine komplett randomisierte dreifaktorielle Wachstumsstudie mit Quinoa im Gewächshaus über 81 Tage mit den Faktoren Kompostzugabe (+/- 2% w/w), geringe bzw. hohe Mineraldüngung (28 und 140 kg N/ha), und Pflanzenkohle-Zugabe-Art (keine, oder je 2% pure (BC_{pure}) oder mitkompostierte Kohlepartikel (BC_{comp}), ebenfalls Gewichstszugaben), um die Effekte dieser drei Faktoren „Biochar-Art“, „Kompost“ und „Düngung“ klar voneinander trennen zu können.

In einer weiteren **Klimakammer-Gefäß-Studie mit LUFA-Standard-Boden 2.2 und Gerste**, ebenfalls mit 2% BC_{pure}, BC_{comp} oder 0% Kohle (control), wurde ¹⁵N-markiertes Ammonium bzw. Nitrat appliziert; neben dem Pflanzenwachstum einschließlich ¹⁵N-Aufnahme und N- bzw. ¹⁵N-Dynamiken im Boden wurden über 30 Tage auch die Kohle-Partikel zurück gewonnen, und auf Gesamt-N und ¹⁵N-Anreicherung analysiert. (Erklärung „stabile Isotope“: ¹⁵N ist das stabile (=ungefährliche, nicht-radioaktive) Isotop des „normalen“ Stickstoffs (¹⁴N); wenn man es in Ökosystemstudien nutzt, so ist es, als hätte man den zugegebenen Stickstoff rot eingefärbt, während der normale N weiß ist. Am „Rosa-Grad“ lässt sich dann messend ablesen, welchen Weg der „rote“ Stickstoff genommen hat, und wie viel von ihm geflossen ist.)

In einer Studie an der Hochschule Geisenheim mit **Riesling-Rebstöcken in Groß-Containern** wurden jeweils 30 und 60 t ha⁻¹ Kompost, Biochar-Kompost (89% + 11% BC_{comp}) oder Kompost plus Biochar nachträglich (89% + 11% BC_{pure}) in einen sandig-armen Oberboden gemischt, der über einem Sand-Unterboden lag. Über eine Vegetationsperiode lang wurden die Rebstöcke nach der üblichen Praxis gezogen und gedüngt. Über Tröpfchen-Bewässerung wurde eine kontinuierliche Auswaschung erzeugt, und am Fuß der Container aufgefangen. Die Nitratauswaschung wurde über monatliche Probenahmen verfolgt, und zudem das Rebenwachstum und der Trauben-Ertrag gemessen.

In einem **Feldversuch** beobachteten wir mit steigender Kohlemenge im Oberboden in einer Frühjahrs-Tiefenbeprobung zum mineralischen Stickstoff-Vorrat **eine signifikante Nitratretention im Oberboden** (dort, wo die Kohle eingebracht war), bei signifikanter Reduktion des Nitrats im Unterboden (30 – 60 und 60 – 90 cm Tiefe). Dies Ergebnis und weitere in diese Richtung führten zu verstärkten **methodische Untersuchungen**: Um die Nährstoffbindung von BC_{pure}, BC_{comp} und Feldgealterter Kohle zu charakterisieren, wurden Kohlepartikel aus den Böden oder Substraten gepickt, und mittels **Elektro-Ultra-Filtration** oder **wiederholten Extraktionen mit 2M KCl** und Wasser untersucht, teils bei Raumtemperatur, und teils im Wasserbad bei 80°C. Die Ergebnisse waren höchst überraschend.

Ergebnisse – eine zusammenfassende Betrachtung

Die **Kompostierung** veränderte durch **Nährstoffbindung** („Beladung“) die Eigenschaften des verwendeten Holzhackschnitzel-Biochars völlig, sodass die Zugabe von BC_{comp} das Pflanzenwachstum bei Nährstoffmangel auf 305% der Kontrolle steigerte. War die Nährstoffversorgung bereits gut (Bsp. +Kompost, +Düngung), fiel der fördernde Effekt geringer, aber immer noch signifikant aus (138% der Kontrolle). Wurde BC_{pure} eingesetzt, waren hingegen eher wachstumsreduzierende oder neutrale Effekte zu beobachten – wie sie aus Feldversuchen hier in Mittel-Europa bekannt sind.

Die mitkompostierte Kohle BC_{comp} zeigte bereits in der **EUF-Analyse** eine **überraschend starke Nitratbelastung bzw. -freisetzung**. Ein beachtlicher Teil des Nitrats und auch des Phosphats war so stark in den mit-kompostierten Biochar-Partikeln gebunden (EUF-Fraktion 2), dass er mit klassischen Methoden nicht annähernd vollständig extrahiert werden konnte. Erst wiederholte Extraktionen mit Wasser und KCl führten zur allmählichen Freisetzung; die Freisetzung wurde durch hohe Temperatur (80°C) gesteigert, was auf unkonventionelle Wasserbrückenbindungen hindeuten könnte[10]. Interessanterweise spielte die Partikelgröße für die extrahierbare Nitrat-Gesamtmenge keine Rolle. Durch wiederholtes Extrahieren mit Wasser und 2M KCl wurden bis zu 5300 mg Nitrat-N pro kg BC_{comp} abgelöst. Daher kann als sicher gelten, dass bei nitratbeladenen Kohlen nicht die gesamte gebundene Nitratmenge durch eine nur einstündige Extraktion mit Wasser oder KCl sichtbar werden wird ($CaCl_2$ wurde von uns noch nicht erprobt). Vermutlich werden durch Pflanzenkohle gebundene Nitratmengen generell unterschätzt.

Bei einer **2 Jahre im Feldversuch** (Sandboden, Groß-Gerau) gealterten Pyreg-Kohle (pyrolysierte Holzhackschnitzel-Siebreste) konnten immerhin 1100 mg Nitrat-N kg^{-1} Kohle-Partikel extrahiert werden, d.h. ohne dass die Kohle je Kontakt zu Kompost gehabt hätte. An diesem Feldstandort wurde bei einer Frühjahrs-Tiefenbeprobung des Bodenprofils im Februar 2014 eine signifikant höhere Nitratkonzentration im Oberboden-Kohlehorizont festgestellt, während die Nitratkonzentration in der Tiefe in den Biochar-Varianten signifikant reduziert war. Dennoch konnte 2014 (bei 0% Mineraldüngung) kein gesteigerter Gerste-Ertrag erzielt werden, was unsere Eingangshypothese zunächst komplett widerlegte. Die sequentielle Extraktion der Biochar-Partikel mit Wasser und KCl ergab dann aber doch einen ersten Hinweis für das Gesamtverständnis des Phänomens: Während beim wachstumsfördernden BC_{comp} ein größerer Anteil des gebundenen Nitrats durch Wasser-Ausschüttelung (1:10) über 1 h ablösbar war, war dieser Anteil in der Feld-gealterten Kohle viel geringer, sowohl absolut als auch relativ. Hier wurde erst durch die vierte sequentielle Ausschüttelung, 24 h mit 2M KCl, der größte Anteil des sequentiell extrahierbaren Nitrats abgelöst.

Eine **Studie mit ^{15}N** brachte weiteres Licht ins Dunkel: Interessanterweise nahm die bereits mit Nitrat „vorbeladene“ BC_{comp} im Sandboden *mehr* ^{15}N -Nitrat auf, als das anfangs nitratfreie BC_{pure} ; nach 3 Tagen waren bis 60% des applizierten Nitrat- ^{15}N an BC_{comp} Partikel gebunden, obwohl diese nur 2 Massen-Prozent der Bodenmischung ausmachten. Dies deutet auf einen quasi aktiven Aufnahme- und Bindungsmechanismus hin. Ein klassisches Bindungsverhalten (Stichwort „Anionenaustauschkapazität“) kann die gefundenen Mengen vermutlich nicht erklären. Die Nitrat-gefüllten BC_{comp} Partikel wirkten als „Austauscher“, sie nahmen ^{15}N auf, gaben aber auch beide N-spezies wieder ab. Dies führt zur Frage nach der Pflanzenverfügbarkeit: Auch in dieser Studie steigerte BC_{comp} das Wachstum der Gerste-Jungpflanzen; interessanterweise wurde diese Steigerung aber erst signifikant, als das mineralische N des Bodens bzw. der Boden-Kohlemischungen (2M KCl) aufgebraucht war – BC_{comp} wirkte somit als Not-Reservoir für „schlechte Zeiten“. Trotz der hohen Nitratfracht am mitkompostierten Biochar waren die Lachgasemissionen in dieser Variante – wie auch die mit unbehandelter Kohle – in Summe über die Studie um über 60% reduziert. Eine signifikante Verminderung der Lachgasemissionen ist ein häufiger Effekt des Einsatzes von Biochar im Boden, wie eine jüngste Meta-Studie zeigte [14]

In der **Groß-Containerstudie mit Riesling** steigerte die Gabe von Kompost oder Biochar-Kompost (trotz einer Mineraldüngung) gleichermaßen das Pflanzenwachstum und den Traubenertrag, und reduzierte stets die Auswaschung von Nitrat. In der Kontrolle wurde durch die Tröpfchen-Bewässerung nahezu der gesamte N-Mineraldünger in Form von Nitrat wieder ausgewaschen. Die

Zugabe von 30 und 60 t ha⁻¹ pures Biochar reduzierten die Nitratauswaschung um etwa 60%, die Kombination aus Kohle und Kompost war jedoch bedeutend effektiver als pures Biochar allein (bei viel geringerem Biochar-Anteil im Mischprodukt). Während es bei 60 t ha⁻¹ Kompostgabe kurz nach Einmischung zu einer stärkeren Nitratfreisetzung kam (die jedoch in Summe immer noch unter der der Kontrolle lag), trat dieser Effekt *nicht* auf, sobald Pflanzenkohle Teil der Mischung war (egal ob +11% BC_{comp} oder +11% BC_{pure}). Noch ist unklar, warum dieser Synergieeffekt auftritt, und die Mischung beider Materialien besser ist als die „Einzelteile“. Bei der EUF-Extraktion der BC_{comp} Partikel bestand eine signifikante Korrelation zwischen der Freisetzung von Nitrat und DOC (*dissolved organic carbon*). Ob dies aber auch einen ursächlichen Zusammenhang hat, und bei der Genese von Schwarzerden eine Schlüsselrolle spielt ist derzeit unklar.

Eine **mögliche Erklärung für die starke Nitrataufnahme** der kompostierten und auch Feld-gealterten Kohle könnte in dem von Conte et al.[10, 11] kürzlich beschriebenen Wechselwirkungen (unconventional H-bonding) der Wassermoleküle um das Nitrat-Ion mit den Kohleoberflächen des Porenraums sein. Diese Wechselwirkungskräfte schwächen sich ab 50°C stark ab – was sich mit der beobachteten stoßartigen Freisetzung von Nitrat nach Temperaturerhöhung auf 80°C (EUF) gut decken würde. Weitere Untersuchungen laufen, gemeinsame Publikationen sind in Vorbereitung.

Fazit

Wie vermutet **verbesserte das Mitkompostieren die Eigenschaften der Pflanzenkohle** stark im Hinblick auf das Pflanzenwachstum, und wie vermutet ist ein Nährstoffeffekt beteiligt oder sogar dominant. Die aktive Nitrataufnahme der Pflanzenkohle („*nitrate capture*“), und deren Ausmaß hingegen war überraschend; im Allgemeinen wird eher eine Ammoniumbindung erwartet. Möglicherweise wird die in Kohle-Böden gebundene Nitratmenge (d.h. die in den Biochar-Partikeln) generell mit Standardextraktionsmethoden unterschätzt, hierzu bedarf es weiterer Tests.

Wir nehmen an (Arbeitshypothese), dass erst eine gewisse Menge Nitrat (und ggf. andere Nährstoffe) in der Kohle gebunden sein muss, bevor diese als „Austauscher-Puffer“ wirken, und für Pflanzen als „Nachlieferungsreservoir“ wirksam werden kann.

Die beobachteten Effekte unterstreichen, dass die **Kombination von C-reicher Pflanzenkohle mit N-reichen organischen Reststoffen** (Festmist, Gülle, Gärreste) sinnvoll und zielführend ist. Wenn, wie angenommen, diffusive Prozesse eine große Rolle spielen, und der Austausch in der wässrigen Phase von Temperaturen über 50°C erleichtert wird, dann könnte dies erklären, warum die aerobe Mieten-Kompostierung (mit einer thermophilen Phase bis 70°C) besonders positiv wirkte. Umgekehrt könnten höhere Temperaturen zur „Beladung“ von Kohle mit Nährstoffen genutzt werden. Die Kurz-Formel für die Kompostierung organischer Reststoffe könnte daher später einmal lauten: „*Pyrolyze the (nutrient-poor woody) rest, and compost it with the (nutrient-rich) best*“, wobei „best“ ausdrücken soll, dass Siedlungs- und Landwirtschafts-Abfälle eigentlich Sekundärrohstoffe sind (im Sinne des Kreislaufwirtschafts- statt Entsorgungsgedankens).

Interessant ist auch die Beobachtung, dass die **Nitrat-Auswaschung durch Kompost-Kohle-Kombinationen am deutlichsten reduziert** wurde. Dies hat zwei Implikationen (wenn dieser Effekt durch weitere Forschungen bestätigt wird, was wir derzeit annehmen).

(1) Kompost-Verbesserung durch Kohle: Von Kohle-Komposten könnten größere Mengen eingesetzt werden als von purem Kompost, ohne dass Nitratauswaschungen ins Grundwasser zu befürchten

sind. Gerade in Regionen mit sandigen, leichten Böden und bekannter Grundwasserbelastung könnte dies zum Grundwasser- und Gewässerschutz gezielt eingesetzt werden – und die Erträge, sowie die Resilienz gegenüber Extremereignissen (Starkregen, Dürre) im Zuge des Klimawandels, könnten sehr wahrscheinlich gesteigert werden.

(2) Kohle-Verbesserung durch Kompostierung: Die Nitrataufnahme der Kohle verbesserte sich durch vorherige Kompostierung (¹⁵N Studie) – unbehandelte Kohle zeigte gleiche Effekte, jedoch weniger ausgeprägt. Die Kompostierung könnte daher eine Beschleunigung derjenigen Vorgänge bedeuten, die vermutlich sonst auch sehr viel langsamer über Jahre und Jahrzehnte im Boden ablaufen.

Die beobachtete **Nitratbindung** könnte eine der **Ursachen für die häufig beobachtete Reduktion von Lachgasemissionen** in Kohle-angereicherten Böden[12] oder in der Kompostierung[13] sein; sowohl Nitrat als auch DOC wurden sorbiert, und beide sind obligatorische Substrate für denitrifizierende Mikroorganismen, die hauptsächlich für die Lachgasemissionen von landwirtschaftlich genutzten Böden verantwortlich sind. Da Mikroorganismen ca. 1 µm groß sind (Durchmesser), Pflanzenkohlen aber zahlreiche Poren mit Durchmessern von <100 nm aufweisen, wäre sorbiertes Nitrat für sie nicht mehr verfügbar.

Es bleibt die Frage nach der unmittelbaren Nutzwirkung für das Pflanzenwachstum: Wir nehmen an, dass es einen „Trade-off“ Punkt zwischen den beiden gewünschten Wirkungen „verringerte Nitratauswaschung“ und „verbessertes Pflanzenwachstum“ geben wird. Daher ist ein verbessertes mechanistisches Grundverständnis der Nitrat- (und sonstigen Nährstoff-) Bindung in verschiedenen Pflanzenkohlen eine Grundvoraussetzung, um die gewünschten positiven Effekte nicht nur praktisch, sondern vielmehr gezielt nutzbar zu machen (Stichwort „*designer chars*“). Gerade für die **biologische Landwirtschaft** mit ihrer engeren Verzahnung von Viehhaltung und Landnutzung, so wie der Notwendigkeit, organische Düngemittel effektiv zu nutzen, ist die Option „Pflanzenkohle als Nährstoffträger“ m.E. sehr interessant.

Eine solche sich bietende Chance zur Verbesserung der „Umweltkosten“ pro Einheit erzeugten Ertrags bei gleichzeitiger Kohlenstoff-Sequestrierung nicht zu ergreifen, und dieses Werkzeug „Pflanzenkohle-Nutzung“ nicht über weitere Forschung zu optimieren käme meiner Auffassung nach einer gesellschaftlichen Bankrotterklärung gleich – derjenigen Gesellschaft, die kräftig an dem globalen Problem mitgewirkt hat vor dem wir jetzt stehen.

Zitierte Literatur

1. Barriopedro, D., E.M. Fischer, J. Luterbacher, R.M. Trigo, R. García-Herrera, 2011: The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Science*, 332: 220-224.
2. Körner, C., 2003: Slow in, rapid out - carbon flux studies and Kyoto targets. *Science*, 300: 1242-1243.
3. Graber, E.R., L. Tsechansky, Z. Gerstl, B. Lew, 2012: High surface area biochar negatively impacts herbicide efficacy. *Plant and Soil*, 353: 95-106.
4. Graber, E.R., L. Tsechansky, J. Khanukov, Y. Oka, 2011: Sorption, volatilization, and efficacy of the fumigant 1,3-dichloropropene in a biochar-amended soil. *Soil Science Society of America Journal*, 75: 1365-1373.
5. Jeffery, S., F.G.A. Verheijen, M. van der Velde, A.C. Bastos, 2011: A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 144: 175-187.

6. Liu, X., A. Zhang, C. Ji, S. Joseph, R. Bian, L. Li, G. Pan, J. Paz-Ferreiro, 2013: Biochar's effect on crop productivity and the dependence on experimental conditions—a meta-analysis of literature data. *Plant and Soil*, 373: 583-594.
7. Cornelissen, G., V. Martinsen, V. Shitumbanuma, V. Alling, G. Breedveld, D. Rutherford, M. Sparrevik, S. Hale, A. Obia, J. Mulder, 2013: Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservation farming sites in Zambia. *Agronomy*, 3: 256-274.
8. Baronti, S., F.P. Vaccari, F. Miglietta, C. Calzolari, E. Lugato, S. Orlandini, R. Pini, C. Zulian, L. Genesisio, 2014: Impact of biochar application on plant water relations in *vitis vinifera* (L.). *European Journal of Agronomy*, 53: 38-44.
9. Vaccari, F.P., S. Baronti, E. Lugato, L. Genesisio, S. Castaldi, F. Fornasier, F. Miglietta, 2011: Biochar as a strategy to sequester carbon and increase yield in durum wheat. *European Journal of Agronomy*, 34: 231-238.
10. Conte, P., U.M. Hanke, V. Marsala, G. Cimò, G. Alonzo, B. Glaser, 2014: Mechanisms of water interaction with pore systems of hydrochar and pyrochar from poplar forestry waste. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62: 4917-4923.
11. Conte, P., V. Marsala, C. De Pasquale, S. Bubici, M. Valagussa, A. Pozzi, G. Alonzo, 2013: Nature of water-biochar interface interactions. *Global Change Biology - Bioenergy*, 5: 116-121.
12. Kammann, C., S. Ratering, C. Eckhard, C. Müller, 2012: Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (CO₂, N₂O, CH₄) fluxes from soils. *Journal of Environmental Quality*, 41: 1052-1066.
13. Wang, C., H. Lu, D. Dong, H. Deng, P.J. Strong, H. Wang, W. Wu, 2013: Insight into the effects of biochar on manure composting: Evidence supporting the relationship between n₂o emission and denitrifying community. *Environmental Science & Technology*, 47: 7341-7349.1.
14. Cayuela, M.L., L. van Zwieten, B.P. Singh, S. Jeffery, A. Roig, M.A. Sánchez-Monedero, 2014: Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 191: 5-16.

*) Die vorgestellten Ergebnisse wurden mit Hilfe bzw. in Kooperation mit folgenden Personen erarbeitet:

Messerschmidt, Nicole¹; Schmidt, Hans-Peter³, Haider, Ghulam¹, Mengel, Jonathan², Linsel, Sebastian¹, Löhnertz, Otmar²; Steffens, Diedrich¹, Koyro, Hans-Werner¹, Müller, Christoph¹ und Conte, Pellegrino⁴

¹)Universität Gießen; ³)Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland; ⁴)University Palermo, Italien; ²)Hochschule Geisenheim University, Von-Lade-Str. 1, 65366 Geisenheim; *claudia.kammann@hs-gm.de