MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH

bmlfuw.gv.at

BIOKOHLE – POTENTIAL UND GRENZEN DER ANWENDUNG IN DER LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT

FACHBEIRAT FÜR BODENFRUCHTBARKEIT UND BODENSCHUTZ IM BMLFUW

IMPRESSUM

Medieninhaber und Herausgeber:
BUNDESMINISTERIUM
FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT,
UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT
Stubenring 1, 1010 Wien
www.bmlfuw.gv.at

Text und Redaktion: Andreas Baumgarten
unter der Mitarbeit von: A. Bohner, V.J. Bruckman, G. Dunst, W. Friesl-Hanl, G. Greutter, S. Höltinger, T. Hofmann, T. Hüffer, M. Huber, B. Hupfauf, K. Keiblinger, B. Kitzler, M. Klinglmüller, U. Kremser, N. Mitterböck, A. Moser, C. Pfeifer, E. Pfundtner, T. Rech, S.M. Schindecker, E. Schmid, S. Schragner, G. Sigmund, G. Soja, H. Spiegel, C. Spann, R. M. Wallner, F. Zehetner
Grafikdesign: Leonie Fink
Lektorat: Ruth M. Wallner, Andreas Baumgarten und Gerhard Soja
Bildnachweis: BMLFUW/ BOKU Franz Zehetner (S. 39)
Gestaltungskonzept: WIEN NORD Werbeagentur

1. Auflage

Alle Rechte vorbehalten.
Wien, 01.08. 2017

Original wurde gedruckt von: Zentrale Kopierstelle des BMLFUW,
UW-Nr. 907, nach der Richtlinie „Druckerzeugnisse“ des
Österreichischen Umweltzeichens.

1 EINLEITUNG

BODENSCHUTZ, BODENFRUCHTBARKEIT UND KLIMASCHUTZ – in Zusammenhang mit diesen Themen wird vermehrt ein möglicher Einsatz von Biokohle in der landwirtschaftlichen Produktion ins Spiel gebracht. Während eine unsachgemäße Herstellung und Anwendung einen Boden nachteilig verändern kann, ist bei fachgerechtem Einsatz sehr wohl ein Nutzen für Bodenqualität und Umwelt zu erwarten. Die vorliegende Broschüre stellt eine auf dem aktuellen Stand des Wissens aufbauende Zusammenstellung von praxisorientierten Informationen zu Biokohlen dar.

Biokohlen sind je nach Herstellungsprozess und Ausgangsmaterialien sehr vielfältig. Sinnvolle Anwendungen und empfehlenswerte Anwendungsbereiche sind stark von den jeweiligen Eigenschaften abhängig. Im Teil 1 der Broschüre wird ein Überblick über die Arten und Einsatzmöglichkeiten von Biokohle gegeben. Dabei werden auch wirtschaftliche Aspekte mit berücksichtigt. Im Teil 2 werden dann die wissenschaftlichen Grundlagen näher ausgeführt und erläutert. Insgesamt steht damit eine fachlich fundierte Übersicht über den möglichen Einsatz dieses für die Land- und Forstwirtschaft relativ neuen Produktes zu Verfügung. Sie zeigt auf, welches Potential in Biokohle steckt, aber auch, welche Grenzen einer Anwendung gesetzt sind.

Diese Broschüre des Fachbeirates hat sich daher die Aufgabe gestellt, zu einer Orientierungshilfe für das Potential und die Grenzen der praktischen Anwendung von Biokohle zu werden. Der erste Berichtsteil fasst die Anwendungsmöglichkeiten für verschiedene Einsatzgebiete im Bereich der Landwirtschaft zusammen. Der zweite Teil arbeitet den Stand des Wissens für die verschiedenen Anwendungsgebiete von Biokohle wissenschaftlich auf. Praktiker, Entscheidungsträger und die interessierte Öffentlichkeit können sich anhand dieses Abrisses und der zahlreichen Verweise auf die Fachliteratur ein Bild von der Vielfältigkeit, aber auch Komplexität des Gebietes der Biokohle-Anwendung machen. Diese Informationen sollen dabei helfen, die richtigen Entscheidungen, über den Einsatz des Werkzeuges Biokohle bei umwelt- und klimarelevanten Fragestellungen in Land- und Forstwirtschaft, Boden- und Wassermanagement zu treffen.

Gerhard Soja (AIT) und Andreas Baumgarten (AGES), im Namen des Redaktionsteams.

INHALTSVERZEICHNIS

IMPRESSUM 2

1 EINLEITUNG 3

2 ZUSAMMENFASSUNG 6

3 TEIL 1 – BIOKOHLE IN DER PRAXIS 8

3.1 ALLGEMEINES 8
3.2 DEFINITIONEN 8

4 DERZEITIGE RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN EINER PRODUKT-ZULASSUNG AUF BASIS VON BIOKOHLE 10

4.1 ABFALLRECHTLICHER RAHMEN 12
4.2 GENEHMIGUNGSVORAUSSETZUNGEN NACH ABFALLRECHT 13

5 QUALITÄTSKRITERIEN UND DEREN ÜBERPRÜFUNG – EINE BESTANDSAUFNAHME 15

6 HERSTELLUNG VON BIOKOHLE 18

7 WIRTSCHAFTLICHKEITS-BETRACHTUNG 19

7.1 WIRTSCHAFTLICHKEITSÜBERLEGUNGEN AUS PRAKTISCHER PERSPEKTIVE 19
7.2 KOSTEN-EFFEKTIVITÄTS-ANALYSE 20

8 BIOKOHLE IN DER LANDWIRTSCHAFT 22

8.1 BIOKOHLE IM ACKERBAU 22
8.2 BIOKOHLE FÜR DAUERKULTUREN 22
8.3 BIOKOHLE IN DER GRÜNLANDWIRTSCHAFT 23
8.4 BIOKOHLE IN DER TIERHALTUNG 24
8.5 BIOKOHLE ALS TORFERSATZ UND ZUR SUBSTRAT-/ ERDENPRODUKTION 25
8.6 BIOKOHLE ALS KOMPOSTBESTANDTEIL 26
8.7 BIOKOHLE IN DER BIOLOGISCHEN LANDWIRTSCHAFT 26

9 BIOKOHLE IN DER FORSTWIRTSCHAFT 27

10 BIOKOHLE-ANWENDUNGEN AUSSERHALB DER LAND-UND FORSTWIRTSCHAFT 28

11 LITERATURÜBERBLICK FACHBÜCHER, REPORTS UND SAMMELPUBLIKAT-IONEN ZUM THEMA BIOKOHLE 29

12 TEIL 2 – WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN 30

12.1 HERSTELLUNG VON BIOKOHLE 30
12.1.1 BIOKOHLE-HERSTELLUNG AUS BIOMASSE-VERGASUNG 30
12.1.2 PYROLYSE ZUR HERSTELLUNG VON BIOKOHLE 31
12.1.3 HTC-, VTC-TECHNOLOGIE ZUR KOHLENHERSTELLUNG 33
12.1.4 KOHLEN AUS NICHT REIN PFLANZLICHEN AUSGANGSSTOFFEN 35
12.1.5 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG: KOSTEN-EFFEKTIVITÄTS-ANALYSE 36
12.2 PHYSIKALISCH-CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN VON BIOKOHLE 38
12.2.1 BIOKOHLE ALS BODENHILFSSTOFF – PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN 38
12.2.2 SORPTION VON ORGANISCHEN SCHADSTOFFEN 41
12.2.3 SORPTION VON SCHWERMETALLEN UND METALLOIDEN 43
12.2.4 WECHSELWIRKUNGEN VON BIOKOHLE MIT PFLANZENNÄHRSTOFFEN 47

12.2.5 AUSWIRKUNGEN VON BIOKOHLE AUF STICKSTOFFMINERALISATION, IMMOBILISATION UND NITRIFIKATION 50
12.2.6 BIOKOHLEAPPLIKATION UND DESSEN AUSWIRKUNG AUF TREIBHAUSGASFLÜSSE (N_2O, CH_4) .. 55
12.3 ANWENDUNG VON BIOKOHLE 60
12.3.1 BIOKOHLE IN DER LANDWIRTSCHAFT 60
12.4 BIOKOHLE IN DER FORSTWIRTSCHAFT 73
12.5 BIOCHAR-ANWENDUNGEN AUSSERHALB DER LAND-UND FORSTWIRTSCHAFT 79

13 TABELLENVERZEICHNIS: 90

14 ABBILDUNGSVERZEICHNIS: 90

2 ZUSAMMENFASSUNG

BIOKOHLE IST EIN „NEWCOMER“ auf dem Gebiet der Bodenhilfsstoffe und organischen Düngemitteln – und trotzdem ein alt bekanntes Produkt: Holzkohle bzw. Grillkohle ist jene Art von Biokohle, welche auf dem Ausgangsmaterial Holz basiert. Während prinzipiell verschiedenste organische Materialien durch Erhitzen unter Sauerstoffmangel (=Pyrolyse) zu Biokohle verkohlt werden können, entsteht die gewohnte Holzkohle nur bei Verwendung des Rohstoffes Holz.

Trotz der ähnlichen Herstellungstechnologien unterscheiden sich Holzkohle und Biokohle in ihren Anwendungszwecken fundamental. Während Holzkohle bzw. Grillkohle ausschließlich zur thermischen Energie-Erzeugung eingesetzt wird (und aufgrund fehlender spezifischer Qualitätsstandards auch zu nichts anderem verwendet werden soll), reicht das Anwendungsspektrum von Biokohle sehr viel weiter. Die Produktfamilie der Karbonisate schließt die hydrothermal produzierten Hydrokohlen und die im Biomasse-Vergasungsprozess entstehenden Vergaserkohlen mit ein. Die Eigenschaften dieser Kohlen und dadurch die Möglichkeiten ihrer Anwendung unterscheiden sich jedoch signifikant von den pyrolytisch hergestellten Biokohlen.

In Österreich kann Biokohle derzeit mit Einzelzulassungen nach Düngemittelrecht in Verkehr gebracht werden. Als Qualitätsstandard hat sich das European Biochar Certificate (EBC) durchgesetzt. Dieses verwenden viele Länder als Standard für die eingesetzte Biomasse, die Produktionstechnik, die Eigenschaften der Kohle und für ihre Anwendung. In Österreich wird derzeit durch die ÖNORM S2211 auch eine Regelung für Produktion und Qualitätsanforderungen von Pflanzenkohle (Biokohle aus pflanzlichen Ausgangsstoffen) erarbeitet. Im Falle der pyrolytischen Verwertung von Abfall anstatt von land-/forstwirtschaftlicher Biomasse sind abfallrechtliche Rahmenbedingungen zu berücksichtigen. Auch ist die Notwendigkeit eines Ausstufungsverfahrens (Nachweis der Nichtgefährlichkeit) zu prüfen. Derzeit kann Biokohle weder in der biologischen Landwirtschaft noch in der kommerziellen Kompostproduktion eingesetzt werden. Um dies zu ermöglichen, sind bei einigen relevanten Richtlinien bzw. Verordnungen Überarbeitungen geplant.

Für die Land- und Forstwirtschaft ist insbesondere die Verwendung von Biokohle als Bodenhilfsstoff relevant. Weitere Anwendungsmöglichkeiten werden andiskutiert, stellen aber keinen Schwerpunkt dieser Broschüre dar. Die standortspezifischen Bedingungen entscheiden, ob die potentiellen Vorteile von Biokohle im Boden realisiert werden: gut versorgte, fruchtbare Böden mit neutralem bis hohem pH Wert und hohem Gehalt an organischem Kohlenstoff profitieren von den physikalisch-chemischen Wirkungen von Biokohle weniger als saure, sandige und humusarme. Auf Basis bisheriger Forschungsergebnisse bestehen Hinweise, dass Biokohle in der Lage ist, insbesondere auf sandigen land- und fortwirtschaftlichen Böden die Wasserspeicherfähigkeit zu erhöhen, sowie die Lachgas-Emissionen (N_2O) und die Nitratauswaschung in das Grundwasser zu verringern. Reine Biokohle ohne sonstige Additive kann aber den pH-Wert signifikant anheben, den Stickstoff immobilisieren und die Mikronährstoffe im Boden weniger pflanzenverfügbar machen. Die Ausbringung von reiner Biokohle wird allerdings nur in den seltensten Fällen empfohlen. Üblicherweise ist eine Kombination mit mineralischer oder organischer Düngung (z.B. Kompost) vorteilhafter, um potentielle Nachteile (Verschiebung des C:N-Verhältnisses, Sorptions-Konkurrenz um Nährstoffe) zu vermeiden. In der Land- und Forstwirtschaft soll ausschließlich zertifizierte Biokohle mit Qualitätsstandards entsprechend EBC oder ÖNORM genutzt werden, damit keine unerwünschten Schadstoffe verfrachtet werden.

Da Biokohle zu 50 bis 90 % aus Kohlenstoff besteht, welcher gegen biologischen Abbau und Mineralisierung sehr resistent ist (Verweilzeiten im Boden: Jahrzehnte bis Jahrhunderte), kann die langfristige Kohlenstoff-Speicherung im Boden durch Biokohle einen Beitrag zum Klimaschutz leisten. Biokohle wird außerdem in der Tierhaltung als Komponente der Einstreu und in der Veterinärmedizin eingesetzt, wo positive Effekte bezüglich der Vitalität der Nutztiere gezeigt werden konnten. Als Wirkungen von Biokohle im Tiermagen wurden die Adsorption von Schadstoffen, pathogenen Keimen und deren Toxine, sowie von Pharmaka und Pestiziden festgestellt; ein positives mikrobiologisches Milieu förderte allgemein die Tiergesundheit.

Außerhalb der Land- und Forstwirtschaft ist Biokohle bzw. Holzkohle oder aktivierte Biokohle unter anderem als Reduktionsmittel bei metallurgischen Anwendungen, als Gärzusatzstoff bei Biogasanlagen, als Lebensmittelzusatzstoff in der Lebensmittelindustrie und als Filter und Sorptionsmittel für Schadstoffe in den Umwelttechnologien bedeutend. Weiters kann Biokohle in Pflanzsubstraten einen Teil der Torffraktion ersetzen und dadurch die Herstellung torfreduzierter oder torffreier Substrate ermöglichen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine optimale Nutzung des Potentials von Biokohle in der Land- und Forstwirtschaft genauer Kenntnis der lokalen Bodenbedingungen bedarf. Wenn die angestrebten Ziele einer Biokohle-Anwendung im Detail identifiziert sind, ist der Einsatz einer für den spezifischen Anwendungszweck optimierten Biokohle am effektivsten. Der Einsatz von Biokohle ist dann am wirtschaftlichsten, wenn das Produkt für mehrere aufeinander folgende Einsatzzwecke genutzt werden kann, bevor es in den Boden eingearbeitet wird (Beispiel: Zusatz in der Stalleinstreu / im Tierfutter führt zu einer Stickstoffkonservierung im Wirtschaftsdünger / im Kompost. Dadurch kann er ohne großen Verlust in den Boden eingearbeitet werden). Weiters sind die gesetzlichen Rahmenbedingungen der Biokohleanwendung zu beachten.

3 TEIL 1 – BIOKOHLE IN DER PRAXIS

3.1 ALLGEMEINES

DIE BIOKOHLE-INDUSTRIE WÄCHST. Weltweit operieren mehr als 200 Firmen auf den Gebieten der Biokohle-Herstellung, des Handels mit Biokohle, der Anwendungs-Optimierung von Biokohle oder der technischen Ausrüstung für die Biokohle-Produktion. Offizielle Umsatzzahlen beliefen sich 2014 global auf etwa 7.500 t Biokohle (ohne Holzkohle); durch Kleinst- und Privatproduzenten für den eigenen Gebrauch wird diese Zahl nach oben zu korrigieren sein.

Trotz der nicht mehr übersehbaren Bedeutung des weltweiten Biokohle-Business ist die Rolle von Biokohle in der österreichischen Wirtschaft durchaus überschaubar. Während die Forschungsintensität weiterhin exponentiell zunimmt (bis dato über 3.300 international publizierte Fachartikel und mehr als 6 Fachbücher zum Thema Biokohle) und das Interesse der Praktiker an einer Biokohle-Anwendung zu zahlreichen Do-it-yourself-Versuchen geführt hat, müssen die rechtlichen Rahmenbedingungen und breitentaugliche, aber abgesicherte Informationen zum Teil erst geschaffen werden. Daher sind die Meinungen darüber geteilt, ob Biokohle in den nächsten Jahren den Durchbruch als neues Hilfsmittel für Land-/Forstwirtschaft und Gartenbau schaffen oder weiterhin ein Nischendasein für einige wenige Spezialanwendungen führen wird. Biokohle soll weder als „Wundermittel“ noch als Büchse der Pandora gesehen werden. Zu zahlreich sind die bereits vorhandenen, wissenschaftlich gut abgesicherten Ergebnisse, welche eindeutig belegen, dass es immer auf die jeweilige Fragestellung und die spezifischen Umwelt- bzw. Bodenbedingungen ankommt, ob der Einsatz von Biokohle, und dabei insbesondere welche Art von Biokohle, sinnvoll und erfolgversprechend ist.

3.2 DEFINITIONEN

Die Vielzahl von Bezeichnungen für verschiedene karbonisierte Materialien erfordert die Verwendung einer einheitlichen Nomenklatur. Im Dienste der Eindeutigkeit von Begriffen im vorliegenden Bericht wird der Nomenklaturvorschlag von Lehmann et al. [1] aufgegriffen und um die Modifikationen von Haubold-Rosar et al. [2] erweitert:

Biokohle / Biochar: Festes Produkt, das nach der thermochemischen Umwandlung von Biomasse in Sauerstoff-limitierter Umgebung (= Pyrolyse) erhalten wird. Biokohle kann direkt als Produkt oder als Bestandteil von Mischprodukten für Maßnahmen des Umweltmanagements [1] eingesetzt werden. Biokohle muss in Bezug auf seine Schadstoffgehalte jene Grenzwerte einhalten, welche in der zukünftigen ÖNORM S 2211-1 festgelegt werden, auch wenn nicht ausschließlich pflanzliche Biomasse für die Herstellung verwendet worden sind.

Biokohle wird als deutscher Begriff für den englischen Terminus Biochar verwendet. Der Begriff Biokohle impliziert nicht automatisch die Möglichkeit der Verwendung in der Biolandwirtschaft oder eine Herkunft der Ausgangsstoffe aus der biologischen Landwirtschaft. Für eine weitere Detaillierung des Typus von Biokohle oder biokohle-ähnlicher Produkte können das Ausgangsmaterial der pyrolysierten Biomasse (z.B. „Pflanzenkohle“, „Klärschlammkohle“) oder die Herstellungsverfahren (z.B. „Pyrolyse-Kohle“, „Hydrokohle“) im Namen verwendet werden.

Pflanzenkohle: Biokohle, die aus pflanzlichen Ausgangsstoffen entsprechend der zukünftigen ÖNORM S 2211 hergestellt worden ist und deren chemische Eigenschaften den dort festgelegten Definitionen entsprechen.

Holzkohle (Charcoal): Ist eine spezielle Form der Biokohle auf Basis von holziger Biomasse und wird mit den gleichen Verfahren wie Biokohle hergestellt.

Hydrokohle (Hydrochar): Festes Produkt der hydrothermalen oder vapothermalen Karbonisierung, abgekürzt als HTC bzw. VTC bezeichnet. Die chemischen und anwendungstechnischen Eigenschaften dieser Produkte können von Biokohle abweichen, der Einsatzzweck kann sich aber mit den Anwendungsformen von Biokohle überschneiden.

Aktivkohle (Activated Carbon): umfasst alle Materialien, die

- durch thermochemische Umwandlung entstanden sind und
- organischen Kohlenstoff enthalten und
- durch Wasserdampf oder Chemikalienzusatz aktiviert und
- für den umwelttechnologischen oder medizinischen Einsatz produziert werden.

Aktivierte Biokohle: Biokohle, die mit Methoden der Aktivkohle-Herstellung behandelt worden ist. Wenn eine Biokohle mit Nährstoffen, Mineralstoffen oder Mikroorganismen-Formulierungen angereichert worden ist, soll die jeweilige Behandlungsform als Detailbezeichnung aufscheinen, beispielsweise „nährstoff-aktivierte Biokohle“ oder „nährstoffangereicherte Biokohle“.

[1] Lehmann, J. and Joseph, S. (eds.): Biochar for Environmental Management. 2nd edition. Earthscan / Routledge, London, 2015.

[2] Haubold-Rosar, M. et al.: Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer «veränderter» Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Texte 04/2016. Umweltbundesamt, Dessau, 2016.

4 DERZEITIGE RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN EINER PRODUKT-ZULASSUNG AUF BASIS VON BIOKOHLE

(Erwin Pfundtner)[1]

IN DEN NÄCHSTEN JAHREN wird das Interesse an der landwirtschaftlichen Verwendung von Biokohle weiterhin steigen. Der Verwendungszweck reicht dabei von Bodenverbesserung, Kompostierzusatz und Trägerstoff für Düngemittel durch entsprechende Behandlung von Gülle und Stalleinstreu bis hin zur Anwendung als Silierhilfsstoff.

Für eine sichere, umweltgerechte und effiziente Anwendung von Biokohleprodukten in der Landwirtschaft müssen unbedingt Sicherheits- und Qualitätskriterien erarbeitet werden. Definition von geeigneten Ausgangsmaterialien, risikobasierte Schadstoffgrenzwerte (Schwermetalle, organische Schadstoffe etc.) und Qualitätsstandards, welche in Normen und entsprechenden Materiengesetzen auf nationaler bzw. europäischer Ebene zu verankern sind, sind die Grundlagen für eine sichere Anwendung von Biokohleprodukten und für eine effiziente Marktüberwachung durch die zuständigen Behörden.

INVERKEHRBRINGEN VON BIOKOHLE NACH ÖSTERREICHISCHEM DÜNGEMITTELRECHT

Biokohle ist kein erlaubter Ausgangsstoff zur Herstellung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen oder Kultursubstraten und erfüllt nicht die Anforderungen eines Typs der Typenregelung der Düngemittelverordnung (DMVO) 2004 [1] in der geltenden Fassung. Ein unmittelbares „In-Verkehr-Bringen“ als Düngemittelprodukt gemäß DMVO 2004 ist somit nicht möglich.

Entspricht wie in diesem Fall ein Produkt aufgrund seiner Zusammensetzung, des Gehalts an Inhaltsstoffen oder der Ausgangsmaterialien nicht einem in der Düngemittelverordnung 2004 beschriebenem Typ, dann besteht die Möglichkeit einer Zulassung per Bescheid gemäß § 9a Düngemittelgesetz 1994. Die zuständige Behörde für die Zulassung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Pflanzenhilfsmitteln und Kultursubstraten gemäß § 9a Düngemittelgesetz (DMG) 1994 [2] ist das Bundesamt für Ernährungssicherheit (BAES). Die Zulassung als Düngemittelprodukt erfolgt auf Antrag des Herstellers nach einem Ermittlungsverfahren durch die Behörde per Bescheid.

[1] Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion, AGES, Spargelfeldstraße 191, 1220 Wien; E-Mail: erwin.pfundtner@ages.at

INVERKEHRBRINGEN VON BIOKOHLE NACH EUROPÄISCHEM DÜNGEMITTELRECHT

Die Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 des europäischen Parlamentes und Rates vom 13.10.2003 über Düngemittel [3] regelt das Inverkehrbringen von mineralischen Düngemitteln und Kalken im europäischen Binnenraum (EU 28). In diesem teilharmonisierenden Recht wird das Inverkehrbringen von Biokohle nicht geregelt.

Seit 2012 arbeitet die europäische Kommission an einem Entwurf für eine neue Düngemittelverordnung, welche das Inverkehrbringen aller Düngemittelprodukte (mineralische und organische Düngemittel, Bodenhilfsstoffe, Pflanzenhilfsmittel und Kultursubstrate) in den 28 europäischen Staaten regeln soll. Laut Information der zuständigen Abteilung (GD Grow) in der Kommission soll in dieser Verordnung auch der Marktzugang von Biokohle als Düngemittelprodukt geregelt werden. Der Vorschlag für die neue Düngemittelverordnung wird derzeit von einer entsprechenden Ratsarbeitsgruppe und dem Europäischen Parlament bearbeitet. Begleitend zu diesem Vorhaben hat die KOMMISSION im Herbst 2015 eine Risikobewertung beim Joint Research Center – Institute for Prospective Technological Studies (JRC-IPTS) – in Sevilla in Auftrag gegeben. Im Rahmen dieser Studie sollte geklärt werden, unter welchen Voraussetzungen (Ausgangsmaterialien, Qualität, Herstellungsprozess, Schadstoffgehalt, Kennzeichnungselemente etc.) Biokohle als Düngemittelprodukt im europäischen Binnenmarkt sicher und effizient verkehrsfähig ist.

Eine weitere Möglichkeit des Inverkehrbringens von Düngemittelprodukten innerhalb von Europa besteht seit 01.12.2009 durch das Prinzip des „freien Warenverkehrs“, das im Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union (AEU-Vertrag) als Teil der „Lissabonverträge“ vereinbart wurde. Dieses Prinzip ermöglicht, dass Düngemittelprodukte, die in einem beliebigen Mitgliedstaat der EU nach dessen nationalen Regelungen legal in Verkehr gebracht werden, in allen anderen Ländern der Union ebenfalls in Verkehr gebracht werden dürfen.

INVERKEHRBRINGEN VON BIOKOHLE ALS DÜNGEMITTELPRODUKT IN ANDEREN EUROPÄISCHEN LÄNDERN

Gemäß der **deutschen** Düngemittelverordnung [4] darf Holzkohle aus unbehandeltem Holz mit einem Kohlenstoffgehalt von mehr als 80 % als Ausgangsstoff für Kultursubstrate und als Trägersubstanz in Verbindung mit der Zugabe von Nährstoffen in der Form zugelassener Düngemittel in Verkehr gebracht werden. Für das Inverkehrbringen von allen Düngemittelprodukten gelten in Deutschland Grenzwerte für Schwermetalle, Dioxine und PCB (Polychlorierte Biphenyle).

Im Rahmen der letzten Novelle der Verordnung über Düngemittel wurde vom Ministerium für Landwirtschaft und Forsten in **Italien** Pflanzenkohle aus der Pyrolyse von Erzeugnissen und Reststoffen mit pflanzlichem Ursprung aus der Land- und Forstwirtschaft und von unbehandeltem Holz als Bodenhilfsstoff in den Anhang der Verordnung aufgenommen. Folgende Qualitätskriterien wurden festgelegt:

- C_{gesamt} biologischen Ursprungs (% Trockensubstanz):
  Klasse 1: > 60
  Klasse 2: > 30 und ≤ 60
  Klasse 3: ≥ 20 und ≤ 30

- Salzgehalt: ≤ 1000 mS/m

- pH (im Wasserextrakt): 4-12

- Feuchtigkeit für pulverförmige Produkte: ≥ 20%

- Asche (% Trockensubstanz)
  Klasse 1: > 10
  Klasse 2: ≥ 10 und ≤ 40
  Klasse 3: > 40 und ≤ 60

- Verhältnis H/C (molar): ≤ 0,7

Das Bundesamt für Landwirtschaft in der **Schweiz** kann für Düngemittel, die nicht einem der in der Düngerverordnung (DüV) 2001 [8] angeführten Typ entsprechen, eine Bewilligung für das Inverkehrbringen erteilen. Im Falle der Einzelbewilligung für Biokohle muss diese den Richtlinien des European Biochar Certificate entsprechen.

INVERKEHRBRINGEN VON PFLANZENKOHLE ALS FUTTERMITTEL

Gemäß EU-VO 68/2013 (Katalog der Einzelfuttermittel) ist Pflanzenkohle generell als Einzelfuttermittel zugelassen. Der Inverkehrbringer muss sich registrieren lassen und haftet für die Einhaltung der vorgeschriebenen Grenzwerte gemäß Richtlinie 2002/32/EG.

4.1 ABFALLRECHTLICHER RAHMEN

(Andreas Moser)[2]

Technisch gesehen stellt eine Produktionsanlage für Biokohle eine Pyrolyse dar. Soweit als Ausgangsstoff für die Herstellung von Biokohle landwirtschaftliche Biomasse und z.B. Sägenebenprodukte („nicht Abfälle“) eingesetzt werden, wäre sie als Produktionsanlage zu klassifizieren.

Im Falle des Einsatzes von Abfällen als alleinigem Ausgangsmaterial oder als Co-Substrat des Pyrolyseprozesses stellt die Anlage eine Abfallpyrolyseanlage dar. Damit greifen insbesondere zwei abfallrechtliche Vorschriften:

Sofern die Pyrolysegase vor einer Verbrennung nicht soweit gereinigt werden, dass sie nicht mehr als Abfall gelten und keine höheren Emissionen verursachen können, als bei der Verbrennung von Erdgas anfallen, unterliegen Abfallpyrolyseanlagen der Abfallverbrennungsverordnung (AVV, BGBl. II Nr. 389/2002 i.d.g.F.).
Insbesondere darf der Schwefelgehalt des Pyrolysegases 10 mg/m³ nicht überschreiten (§2 Abs 1a der AVV).

Nicht von dieser Bestimmung betroffen sind Anlagen, die ausschließlich folgende Materialien einsetzen (§ 2 Abs 2 AVV):

- pflanzliche Abfälle aus der Land und Forstwirtschaft,

[2] BMLFUW, Abteilung V/3, Stubenbastei 5, 1010 Wien; E-Mail: andreas.moser@bmlfuw.gv.at

- pflanzliche Abfälle aus der Nahrungsmittelindustrie, falls die erzeugte Wärme genutzt wird,

- faserige pflanzliche Abfälle aus der Herstellung von natürlichem Zellstoff und aus der Herstellung von Papier aus Zellstoff, falls sie am Herstellungsort verbrannt werden und die erzeugte Wärme genutzt wird,

- Holzabfälle mit Ausnahme solcher, die infolge einer Behandlung mit Holzschutzmitteln oder einer Beschichtung halogenorganische Verbindungen oder Schwermetalle enthalten können (insbesondere solche Holzabfälle aus Bau- und Abbruchabfällen),

- Korkabfälle

Gemäß der Abfallverzeichnisverordnung (BGBl II 2003/570 i.d.g.F.) handelt es sich bei den Pyrolyserückständen um gefährlichen Abfall (Abfallschlüsselnummer 31316 „Schlacken und Aschen aus Abfallpyrolyseanlagen“). Der Nachweis der Ungefährlichkeit kann nur im Zuge eines Ausstufungsverfahrens für gefährliche Abfälle im Einzelfall erbracht werden (zuständige Behörde ist dabei das BMLFUW). Dieser Nachweis ist auch eine Voraussetzung für eine allfällige Einzelzulassung nach § 9 a Düngemittelgesetz.

Soweit ein Abfallende erreicht wird, sind die Erfordernisse der REACH Verordnung (EG) Nr. 1907/2006 einzuhalten (Registrierungspflicht etc.). Eine Registrierung unter REACH ist eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für die Einstufung als „nicht Abfall“.

4.2 GENEHMIGUNGSVORAUSSETZUNGEN NACH ABFALLRECHT

(Ulrich Kremser)[3]

Werden in einer Anlage zur Herstellung von Biokohle auch Abfälle als Ausgangsmaterial verwendet, finden die abfallrechtlichen Vorschriften des Abfallwirtschaftsgesetzes (AWG 2002) Anwendung. Die Sammlung und Behandlung dieser als Abfälle einzustufenden Ausgangsmaterialen bedarf einer Erlaubnis durch den zuständigen Landeshauptmann (vgl. § 24a AWG 2002). Die Anlage zur Herstellung der Biokohle ist in diesem Fall als Abfallbehandlungsanlage zu qualifizieren, deren Errichtung und Betrieb – wie auch eine wesentliche Änderung – einer behördlichen Genehmigung nach § 37 Abs. 1 AWG 2002 bedarf. Eine Pyrolyseanlage zur Herstellung von Biokohle erfüllt auch keinen Ausnahmetatbestand des § 37 Abs. 2. AWG 2002 (Behandlungsanlage zur ausschließlichen stofflichen Verwertung von Abfällen). Nach ständiger Judikatur des VwGH ist die stoffliche Verwertung von Abfällen im Sinne des § 2 Abs. 5 Z 2 AWG 2002 nämlich so zu verstehen, dass darunter nur der abschließende Verwertungsschritt zu subsumieren ist, nicht aber allfällige Vorbehandlungsschritte zur stofflichen Verwertung.

Bis zum Zeitpunkt der unmittelbaren Substitution von natürlichen Rohstoffen gelten Abfälle oder die aus ihnen gewonnenen Stoffe weiterhin als Abfall (vgl. dazu auch § 5 Abs. 1 AWG 2002). Die durch einen Pyrolyseprozess hergestellte Biokohle ist somit im Regelfall rechtlich nach wie vor als Abfall einzustufen und unterliegt damit auch den allgemeinen Behandlungspflichten nach § 15 AWG 2002. Ein dem abschließenden Verwertungsschritt zeitlich vorgeschaltetes, sogenanntes vorzeitiges Abfallende kann für bestimmte Abfälle nur durch Festlegung von Kriterien in einer Verordnung auf nationaler oder auf EU-Ebene erfolgen. Solche Kriterien, bei deren Einhaltung aus Abfällen

[3] BMLFUW, Abteilung V/2, Stubenbastei 5, 1010 Wien; E-Mail: ulrich.kremser@bmlfuw.gv.at

hergestellte Biokohle ihre Abfalleigenschaft vorzeitig verliert, wurden bisher auf rechtliche verbindliche Art nicht festgelegt.

5 QUALITÄTSKRITERIEN UND DEREN ÜBERPRÜFUNG – EINE BESTANDSAUFNAHME

(Erwin Pfundtner)[4]

EUROPEAN BIOCHAR CERTIFICATE – RICHTLINIE FÜR DIE NACHHALTIGE PRODUKTION VON PFLANZENKOHLE [6]

Ziel dieser Richtlinie ist, eine wissenschaftlich stichhaltige, gesetzlich abgesicherte, wirtschaftlich verantwortbare und praktisch umsetzbare Kontrolle der Produktion und Qualität von Pflanzenkohle zu gewährleisten. Für Anwender von Pflanzenkohle und Produkten auf Basis von Pflanzenkohlen soll eine transparente und nachvollziehbare Kontrolle und Qualitätsgarantie ermöglicht werden. Das European Biochar Certificate ist ein freiwilliger Industriestandard in Europa. In der Schweiz ist dessen Einhaltung für eine Genehmigung des Einsatzes in der Landwirtschaft verpflichtend.

Zur Erlangung des European Biochar Certificates müssen bestimmte Kriterien bezüglich der eingesetzten Biomasse, der Produktionstechnik, den Eigenschaften der Pflanzenkohle und deren Ausbringung erfüllt werden:

- Zur Herstellung von Biokohle dürfen nur pflanzliche Reststoffe aus der kommunalen getrennten Sammlung, aus dem Garten- und Landschaftsbau, aus der Land- und Forstwirtschaft sowie aus der Nahrungs-, Lebens- und Genussmittelherstellung verwendet werden. Ebenfalls zulässig im Sinne dieser Richtlinie sind Papierfaserschlamm aus unbehandelten Holzfasern, Verpackungsmaterialien aus pflanzlichen Stoffen, Gärreste aus nachwachsenden Rohstoffen aus biologischem Anbau sowie ausgewählte organisch-mineralische Bestandteile.

- Der Herstellungsprozess ist in einem Produktionsprotokoll zu dokumentieren (Pyrolysetemperatur, eingesetzte Ausgangsmaterialien, etc.).

- Bezüglich der Probenahme gelten spezifische Vorschriften.

Die Biokohle muss folgende Eigenschaften erfüllen:

- Der Kohlenstoffgehalt der Biokohle muss mehr als 50 % der Trockenmasse betragen.

- Das molare H/C_{org}-Verhältnis muss kleiner als 0,7 sein.

- Das molare O/C_{org}-Verhältnis muss kleiner als 0,4 sein.

[4] Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion, AGES, Spargelfeldstraße 191, 1220 Wien; E-Mail: erwin.pfundtner@ages.at

- Bei einer Jahresproduktion von mehr als 50 Tonnen müssen flüchtige organische Verbindungen (VOC) deklariert werden.
- Der Gehalt an Stickstoff, Phosphor, Kalium, Magnesium und Kalzium ist zu deklarieren.
- Auf dem Lieferschein müssen pH-Wert, Schüttdichte, Wassergehalt und die spezifische Oberfläche angegeben werden.
- Die entsprechenden Schwermetallgrenzwerte sind einzuhalten.
- Die PAK-Gehalte (Summe der 16 Leitverbindungen der EPA) der Biokohle müssen für die Qualitätsstufe „basic“ unter 12 mg kg^{-1} TM und für Qualitätsstufe „premium“ unter 4 mg kg^{-1} TM liegen.
- Der PCB-Gehalt muss unter 0,2 mg kg^{-1} TM, der Gehalt an Dioxinen und Furanen jeweils unter 20 ng kg^{-1} (I-TEQ OMS) liegen.

Für jedes Qualitätskriterium sind die anzuwendenden Untersuchungsmethoden (Normen gemäß ÖNORM, DIN, EN oder ISO) festgelegt. Aufgrund der hohen Adsorptionsfähigkeit der Pflanzenkohle wurde bei der Methode zur PAK (Polyaromatische Kohlenwasserstoffe) Untersuchung die Verwendung des Extraktionsmittels Toluol festgelegt.

ÖNORM S2211: PFLANZENKOHLE – TEIL 1: AUSGANGSMATERIALIEN, QUALITÄTSANFORDERUNGEN UND UNTERSUCHUNGSMETHODEN

Im österreichischen Normungsinstitut Austrian Standard Institute erarbeitet eine Gruppe von Experten aus den Bereichen Wirtschaft, Beratung, Landwirtschaft und Forschung sowie verschiedenen Bundes- und Landesbehörden eine Norm, welche die Ausgangsmaterialien, Qualitätsanforderungen und die Untersuchungsmethoden für Pflanzenkohlen regelt. Pflanzenkohlen im Sinne der ÖNORM S2211 dürfen nur aus der Pyrolyse von pflanzlicher Biomasse hergestellt werden. Pyrolyse wird als thermochemischer Prozess bei stark reduziertem Sauerstoffgehalt und bei Temperaturen zwischen 400° C und 800° C definiert.

Pflanzenkohlen, die dieser Norm entsprechen, müssen folgende Anforderungen erfüllen:

- Pflanzenkohlen im Sinne dieser Norm dürfen nur aus Ausgangsmaterialien hergestellt werden, die im Anhang der Norm aufgelistet sind. Bei den erlaubten Ausgangsstoffen handelt es sich im Wesentlichen um Reststoffe der landwirtschaftlichen Urproduktion und der Lebens- und Futtermittelindustrie, unbehandeltes Holz und Holznebenprodukte.
- Der Gehalt an organischem Kohlenstoff muss mehr als 50 % der Trockenmasse betragen.
- Das molare H/C_{org}-Verhältnis muss geringer als 0,7 sein.
- Haupt- bzw. Sekundärnährstoffe (N, P, K, Mg, Ca, S) müssen angegeben werden.
- Die vorgegebenen Schwermetallgrenzwerte (zwei Klassen) müssen eingehalten werden. Bei einer Verwendung der Pflanzenkohle in der biologischen Landwirtschaft müssen die Grenzwerte der VO 834/2007 [7] eingehalten werden.

- Bei Verwendung in der „konventionellen“ Landwirtschaft sind die Grenzwerte der Düngemittelverordnung 2004 [2] einzuhalten.

- Die vorgegebenen Grenzwerte für PAK (16), Dioxine und PCB sind einzuhalten.

- pH-Wert (Wasserextrakt), spezifische Oberfläche, Wassergehalt und Salzgehalt/Leitfähigkeit sind anzugeben.

In dieser Norm wurden auch die für die jeweiligen Parameter geeigneten Untersuchungsmethoden (ÖNORMEN und EN Normen) festgelegt.

LITERATUR ZU DEN KAPITELN 4 UND 5

[1] Bundesgesetz über den Verkehr mit Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelgesetz 1994 -DMG 1994); StF: BGBl. Nr. 513/1994

[2] Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, mit der Bestimmungen zur Durchführung des Düngemittelgesetzes 1994 erlassen werden (Düngemittelverordnung 2004); StF: BGBl. II Nr. 100/2004

[3] Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 des europäischen Parlamentes und Rates vom 13.10.2003 über Düngemittel; Amtsblatt EU L 304/1 vom 21.11.2003

[4] Düngemittelverordnung Deutschland vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 27. Mai 2015 (BGBl. I S. 886) geändert worden ist. Bonn am 05.12.2012

[5] Neuordnung und Überprüfung der Vorschriften für Düngemittel (Italien), Verordnung Nr. 75 vom 29. April 2010; Änderung der Anhänge 2, 6 und 7 vom 16.07.2014

[6] EBC: European Biochar Certificate – Richtlinien für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle, European Biochar Foundation (EBC), Arbaz, Switzerland, 2012 http://www.european-biochar.org/en/download. Version 7.2 of 4th February 2016, DOI:10.13140/RG.2.1.4658.7043

[7] Verordnung (EWG) Nr. 834/2007 des Rates vom 28. Juni 2007 über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen, 20. Juli 2007 im Amtsblatt L 189/1

[8] Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern (Dünger-Verordnung, DüV) vom 10. Januar 2001 (Stand am 1. Februar 2016)

6 HERSTELLUNG VON BIOKOHLE

(Christoph Pfeifer) [5]

DIE DERZEIT VERBREITETEN thermo-chemischen Prozesse zur Herstellung von Biokohle können in drei Gruppen gegliedert werden: Pyrolyse, Vergasung und hydrothermale Verfahren. Bei der Pyrolyse finden Entgasungs- und Spaltungsvorgänge unter Sauerstoffausschluss statt. In Abhängigkeit der Prozessbedingungen (400–600° C) und der Eingangsstoffe werden jeweils ungefähr 20–30 % (w/w) in Pyrolyse-Gas und Kohle und der Rest in sogenanntes Pyrolyseöl übergeführt. Bei Vergasung und Zufügen eines Vergasungsmittels kommt es bei den üblichen Temperaturen von 700 bis 900° C primär zur Umwandlung in gasförmige Komponenten und in geringen Mengen auch in Biokohle. Prinzipiell kann auch bei höheren Temperaturen vergast werden, dabei ist aber der Umsetzungsgrad beinahe 100 % und es verbleibt keine feste Kohle. Die hydrothermale Karbonisierung führt die Biomasse bei Temperaturen von 200–250° C und autogenem Druck (20-50 bar) in wässriger Atmosphäre (ca. 20 % Trockenmasse) in eine sogenannte Hydrokohle über, in welcher ca. 80 % des ursprünglichen Kohlenstoffs enthalten sind. Der Rest des Kohlenstoffs findet sich im Prozesswasser gelöst in organischen Verbindungen und ungelösten Kohlenstoffpartikeln sowie in sehr geringen Mengen in einem Produktgasstrom.

[5]Institut für Verfahrens- und Energietechnik (IVET) , Muthgasse 107/I, 1190 Wien; E-Mail: christoph.pfeifer@boku.ac.at

7 WIRTSCHAFTLICHKEITS-BETRACHTUNG

7.1 WIRTSCHAFTLICHKEITSÜBERLEGUNGEN AUS PRAKTISCHER PERSPEKTIVE

(Gerald Dunst)[6]

Derzeit wird Biokohle je nach Qualität, Produktionsart und Marktsituation zu einem Preis von 200 – 2.000 €/Tonne angeboten. Aufgrund des mittlerweile weltweiten Handels, der aufstrebenden Vergasungstechnologie und der zunehmenden Anzahl von reinen Biokohle-Produktionsanlagen stehen derzeit ausreichende Mengen für die verschiedensten Anwendungszwecke zur Verfügung.

Langfristige Wirkungsmechanismen von Biokohle können auf Grund von experimentellen Einschränkungen bei der üblichen Versuchsdauer bei Freilandversuchen derzeit nur eingeschränkt abgeschätzt werden und erfordern ein längerfristiges Monitoring der bereits vorhandenen Feldversuche. Eine direkte Ausbringung von nicht aufbereiteter (Nährstoff-ergänzter) Biokohle auf landwirtschaftliche Böden kann aus fachlichen und wirtschaftlichen Überlegungen für die meisten Anwendungsoptionen nicht empfohlen werden. Bei einem üblichen Marktpreis von 500 €/Tonne und Aufwandsmengen von 10-30 Tonnen/ha wäre demnach mit einem Kostenaufwand von 5.000-15.000 €/ha zu rechnen, um messbare Wirkungen zu erzielen. Allerdings sind derzeit Untersuchungen im Laufen, welche teilweise auch bei wesentlich niedrigeren Aufwandmengen (0,5-2 t/ha) positive Wirkungen beobachtet haben. Für eine generelle Empfehlung so niedriger Biokohle-Dosierungen fehlen jedoch noch ausreichend belastbare Ergebnisse.

Um die Eigenschaften von Biokohlen optimal nutzen zu können, müssen diese zuvor mit Nährstoffen in Verbindung gebracht werden. Wirtschaftlich ist der Einsatz also überall dort sinnvoll, wo mit der Anwendung von Biokohle Nährstoffverluste (vor allem bezüglich N) reduziert werden können. Zusätzlich können auch Geruchsemissionen verringert werden.

Für die Aufbereitung von Stallmist oder Gülle wird eine Aufwandsmenge von 4 kg/m^3 empfohlen (entspricht einem Kostenaufwand von 2 €/m^3). Um die Wirtschaftlichkeit alleine durch die Reduktion der Nährstoffverluste, bzw. deren besseren Wirkung/Verfügbarkeit im Boden rechtfertigen zu wollen, müsste die Biokohle die Verluste um 20-40 % reduzieren können. Obwohl solche Nährstoffmengen nicht direkt an der Oberfläche der Kohle gebunden werden können, werden Effekte in dieser Größenordnung in der Praxis durch indirekte Wirkungen (Beeinflussung der Bodeneigenschaften) immer wieder beobachtet.

Noch effizienter ist der Einsatz von Biokohle über die Fütterung von Nutztieren (dafür können Biokohlen extra zugelassen werden). Die empfohlenen Aufwandsmengen betragen in diesem Bereich rund 0,4 g Biokohle/kg Lebendgewicht und Tag. Die Haupteffekte sind eine bessere Futterverwertung, bessere Tiergesundheit und eine Geruchsreduktion der Ausscheidungen. Diese Beobachtungen haben landwirtschaftliche Betriebe bereits dazu veranlasst, sich für die regelmäßige Anwendung von Biokohle zu entscheiden.

---

[6] Fa. Sonnenerde, Oberwarterstraße 100, 7422 Riedlingsdorf ; E-Mail: g.dunst@sonnenerde.at

Immer öfter wird Biokohle auch als Silagezusatz angewandt, weil dadurch die Silage weniger zu Fehlgärungen neigt und die Futterqualität erhöht wird. Je früher Biokohle in der Tierhaltung angewendet wird, desto wirtschaftlicher ist deren Einsatz: durch diese kaskadische Nutzung (besseres Futter – gesündere Tiere – Reduktion der Nährstoffverluste im Wirtschaftsdünger) kann kann von der Wirkung von Biokohle mehrfach profitiert werden.

Bei der Anwendung in Biogasanlagen wurde mehrfach eine Steigerung des Gasertrages beobachtet. Um den Einsatz hier wirtschaftlich rechtfertigen zu können, muss für 1 % Biokohle-Zugabe der Gasertrag um 3 % steigen, was durchaus realistisch ist. Der Haupteffekt liegt aber in einer stabileren Biologie – Schwankungen im Rohmaterial werden leichter verkraftet, die Anlagen stürzen nicht so leicht ab und die Gaszusammensetzungen sind konstanter als ohne Biokohle.

7.2 KOSTEN-EFFEKTIVITÄTS-ANALYSE

(Michaela Klinglmüller, Stefan Höltinger & Erwin Schmid)[7]

Das ökonomische Potential des Biokohle-Einsatzes in der österreichischen Landwirtschaft wurde im Rahmen einer **Kosten-Effektivitäts-Analyse** (KEA) ermittelt. Dafür wurden Biomasse und Technologie spezifische Produktionskosten sowie Treibhausgas (THG)-Reduktionspotentiale für österreichische Ackerböden auf Basis der Ergebnisse des BIOCHAR-Projektes [1] und einer umfassenden Literarturanalyse [2] errechnet. Die Unsicherheiten in den Daten insbesondere bei den Produktionskosten und THG-Vermeidungspotentialen sowie der Einfluss dieser auf das Ergebnis sind speziell untersucht worden.

Daten und Annahmen im Überblick[8,9]:

- Aufgrund der großen Preisschwankungen und der unterschiedlichen Produktqualitäten (bspw. Restholz und Sägenebenprodukte im Vergleich zu Holzhackgut) werden **Rohstoffpreise** im Bereich von 60 bis 120 € t^{-1} angenommen.

- Kosten für den Biomassetransport betragen zwischen 0,20 - 0,60 € t^{-1} km^{-1}. Die **Transportkosten** werden von den erforderlichen Rohstoffmengen bzw. den damit verbundenen Transportdistanzen bestimmt. Diese variieren je nach Pyrolyseverfahren und Anlagengröße.

- Die **Produktionskosten** (Kapital- und Betriebskosten) von Biokohle sind im Wesentlichen abhängig von der Pyrolysetechnologie (schnelle und langsame Pyrolyseverfahren) sowie der Anlagengröße (untersuchte Biomassekapazitäten von 2.000 bis 185.000 t a^{-1}).

- In den **Ausbringungskosten** wird eine Ausbringungsmenge von 30 t ha^{-1} Biokohle und ein durchschnittlicher Transportweg von 2 km angenommen.

- In den **Erlösen** werden nur die Einnahmen aus dem Nebenprodukt Synthesegas berücksichtigt.

---

[7] Universität für Bodenkultur, Institut für Nachhaltige Wirtschaftsentwicklung, Feistmantelstr. 4, 1180 Wien;
E-Mail: michaela.klinglmueller@gmail.com
[8] *Mengenangaben beziehen sich immer auf Trockensubstanz*
[9] *Details zu den Berechnungsgrundlagen siehe [2, 3]*

– Für die Berechnung des **THG-Reduktionspotentials** von Biokohle wurden folgende Annahmen getroffen: (i) 40-50 % des Biokohle-C-Gehalts können über mindestens 100 Jahre im Boden gespeichert werden, (ii) N_2O-Emissionen können bei gedüngten Böden für einen Zeitraum von 10 Jahren um bis zu 50 % gesenkt und (iii) zusätzliche THG-Einsparungen können durch die Substitution von Erdöl durch Synthesegas erzielt werden.

Die Berechnungen zeigen THG-Vermeidungskosten von 150 bis 200 € t^{-1} CO_2e für langsam pyrolysierte Biokohle und 380 bis 830 € t^{-1} CO_2e für schnell pyrolysierte Biokohle[10]. Ein langsames Pyrolyseverfahren produziert Biokohle zu deutlich niedrigeren Kosten als schnelle Pyrolyseverfahren und liefert zudem eine deutlich höhere Biokohle-Ausbeute.

LITERATUR

[1] Soja, G., F. Zehetner, S. Zechmeister-Boltenstern, S. Kloss, A. Watzinger, B. Wimmer, B. Kitzler, M. Klinglmüller & S. Gunczy: More uses of biochar than carbon sequestration? Consideration of biochar cost effectiveness in agriculture, ALVA Tagungsbericht; Vienna, Austria, 2014

[2] Klinglmüller, M.: Effects of biochar on greenhouse gas fluxes of agricultural soils and resulting greenhouse gas abatement costs – an Austrian case study (Master Thesis). University for Natural Resources and Life Sciences, Wien, 2013

[3] Bruckman, V.J. & M. Klinglmüller: Potentials to mitigate climate change using biochar – the Austrian perspective, in: In: Bruckman, V.J., Liu, J., Uzun, B.B. and Apaydın-Varol, E. (Eds.) Potentials to Mitigate Climate Change Using Biokohle, 2016

Darüber hinaus sind zu beachten:

Finkenrath, M.: Cost and performance of carbon dioxide capture from power generation, 2011

Höltinger, S., J. Schmidt, M. Schönhart & E. Schmid: A spatially explicit techno-economic assessment of green biorefinery concepts. Biofuels, Bioprod. Bioref 8, 325–341. doi:10.1002/bbb.1461, 2014

Nabuurs, G. J. & O. Masera: Forestry, in: Metz, B, Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R. & Meyer, L.A. (eds.): Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 541–584, 2007

Schmidt, J., S. Leduc, E. Dotzauer, G. Kindermann & E. Schmid: Cost-effective CO2 emission reduction through heat, power and biofuel production from woody biomass: A spatially explicit comparison of conversion technologies. Applied Energy 87, 2128–2141. doi: 10.1016/j.apenergy.2009.11.007, 2010

[10] *Abhängig von Kosten- und Vermeidungsszenario sowie der Anlagenkapazität*

8 BIOKOHLE IN DER LANDWIRTSCHAFT

8.1 BIOKOHLE IM ACKERBAU

(Heide Spiegel, Caroline Spann, Andreas Baumgarten)[11]

Dieses Kapitel bietet einen kurzen Überblick über Stärken und Schwächen der Anwendung von Biokohle im Ackerbau in gemäßigten Klimagebieten. Positiv auf den Boden wirken die Anhebung stark saurer pH-Werte und die dadurch bedingte erhöhte mikrobielle Aktivität, die Verbesserung der Verfügbarkeit von Nährstoffen, sowie die verminderte Toxizität von ausgewählten Schadstoffen (z.B. Cd). Erhöht werden können auch die Kationenaustauschkapazität (KAK), die Gehalte der pflanzenverfügbaren Nährstoffe Phosphor und Kalium (P_{CAL}, K_{CAL}) sowie der gesamte und der wasserlösliche organische Kohlenstoff (C_{org} und DOC) und zum Teil das N-Mineralisierungspotenzial. Ebenso können Verbesserungen bodenphysikalischer Bodeneigenschaften (z.B. Erhöhung der Feldkapazität, d.h. der Wasserverfügbarkeit, Abnahme der Rohdichte) beobachtet werden. Auch die Habitatfunktion des Bodens für Bodenorganismen wurde verbessert. An einigen Standorten und für ausgewählte Kulturen erhöhten sich die Erträge. Allgemein konnten Nährstoff-Verluste vermindert werden, wie z.B. die N- und P-Auswaschung, gasförmige NH_3-Verluste sowie N_2O Emissionen. Ganz allgemein verminderte eine Biokohlen-Anwendung die Treibhausgas-Emissionen.

Eine mögliche Schwäche der Anwendung von Biokohle ist der Anstieg des pH-Wertes, wenn der Boden ohnehin schon leicht alkalisch ist und wenn dadurch die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen (z.B. P), insbesondere auch von Mikronährstoffen (Cu, Fe, Mn, Zn), verringert wird oder wenn die Verfügbarkeit und die Aufnahme von Mo stark erhöht werden. Zudem kann die elektrische Leitfähigkeit durch den Salzgehalt von Biokohle erhöht werden. Nach Biokohle-Anwendung wurden hohe S-Gehalte gefunden und das C:N Verhältnis erhöht, was auch auf eine N-Immobilisierung hinweist. Berichtet wurde auch über Abnahmen des (pflanzenverfügbaren) Nitratgehalts im Boden. Berücksichtigt man den pflanzlichen Nährstoffbedarf nicht, so kann es zu Ertragseinbußen kommen, und bei Verwendung nicht-zertifizierter, minderqualitativer Biokohle können Schadstoffeinträge nicht ausgeschlossen werden.

8.2 BIOKOHLE FÜR DAUERKULTUREN

(Gerhard Soja)[12]

Viele der für den Ackerbau relevanten direkten und indirekten Effekte von Biokohle sind auch im Obst- und Weinbau zu berücksichtigen. Spezielle Bedingungen können sich im Falle von langjährigem Verzicht auf Reihen-Begrünungen und dadurch induzierte geringe Humusgehalte ergeben: bei den erforderlichen Gaben organischer Dünger kann Biokohle den langfristigen Aufbau höherer C_{org}-Gehalte signifikant unterstützen. Das anfallende Schnittholz empfiehlt sich als Input-Material für die Biokohle-Herstellung, um bei Wiederausbringung des Karbonisates die Kreisläufe

[11] Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion, AGES, Spargelfeldstraße 191, 1220 Wien; E-Mail: adelheid.spiegel@ages.at
[12] Energy Department, Environmental Resources and Technologies, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Konrad Lorenz-Str. 24, 3430 Tulln; E-Mail: gerhard.soja@ait.ac.at

von Kohlenstoff und Nährstoffen zu schließen. Dies unterstützt auch die Verringerung des CO_2-Fußabdrucks des Obst- und Weinbaus. Allerdings ist bei Verwendung von kupferhaltigen Fungiziden die Gefahr hoher Kupfergehalte in einer rebholz-basierten Biokohle gegeben.

Die durch vergangene Fungizid-Anwendungen in Weingartenböden fallweise erhöhten Kupfer-Gehalte erfordern besondere Wahl der organischen Düngung. Materialien mit hoher Verfügbarkeit von löslichen organischen Komponenten (wie Kompost) erhöhen die Mobilität und Verfügbarkeit von Kupfer, während geringe Gehalte leicht verfügbaren organischen Kohlenstoffs im Additiv (wie bei Biokohle) eher die Sorptionswirkung für Kupfer und damit dessen Immobilisierung fördern.

Verschiedene Studien weisen auf eine Verbesserung der Wasserversorgung der Böden und auf Unterdrückung einiger bodenbürtiger Krankheiten in Obst- und Weinanlagen durch Biokohle hin.

8.3 BIOKOHLE IN DER GRÜNLANDWIRTSCHAFT

(Andreas Bohner)[13]

Im Dauergrünland ist der Einsatz von Biokohle bei bestimmten Bodenbedingungen sinnvoll und erfolgversprechend. Folgende Möglichkeiten bieten sich an:

- In stark sauren Grünlandböden (pH $CaCl_2$: < 5.0) kann eine Zufuhr von Biokohle den pH-Wert erhöhen.
- In Grünlandböden mit niedrigen Gehalten an pflanzenverfügbarem Kalium kann durch Zufuhr von Kalium reicher Biokohle (Biokohle aus Pflanzenmaterial) der Kaliumgehalt im Boden rasch erhöht, der Kaliumgehalt in den Pflanzen deutlich gesteigert und das Pflanzenwachstum gefördert werden.
- Phosphor reiche Biokohle (Biokohle aus tierischen Ausgangsstoffen oder Klärschlamm) kann vor allem in sauren Grünlandböden die Phosphor-Ernährung der Pflanzen verbessern, wenn Biokohle in Verbindung mit Stallmist oder Kompost ausgebracht wird.
- Die Zufuhr von Biokohle kann das Kleewachstum fördern, vor allem in Grünlandböden mit niedrigen Gehalten an pflanzenverfügbarem Kalium.
- In stark wechselfeuchten Grünlandböden können Stickstoffverluste durch N_2O-Emissionen aus dem Boden durch Zufuhr von Biokohle reduziert werden.
- In seichtgründigen, humusarmen, sandigen und/oder skelettreichen Grünlandböden kann Biokohle die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge erhöhen und somit auch die Wasserversorgung der Grünlandpflanzen verbessern.

[13] HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 8952 Irdning-Donnersbachtal; E-Mail: andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at

8.4 BIOKOHLE IN DER TIERHALTUNG

(Gerald Dunst)[14]

Wie im Kapitel „Wirtschaftlichkeit“ bereits beschrieben, kann der Biokohle-Einsatz in der Tierhaltung sinnvoll sein. Dabei werden im Wirtschaftsdünger folgende Effekte erzielt:

a. Abtrocknung

b. Reduktion der Fäulnis und damit des Geruchs

c. Stickstoffkonservierung

Veränderung der mikrobiologischen Zusammensetzung und dadurch Erhöhung des Düngewertes

Mit Biokohle behandelter Wirtschaftsdünger hat eine bessere Düngewirksamkeit. Aufgrund der geringen Biokohlemengen die dabei in den Boden gelangen, sind hier zumindest kurzfristig keine signifikanten Unterschiede im Bereich der Bodenphysik zu erwarten.

Dennoch werden die mikrobiologische Zusammensetzung auch bei diesen geringen Mengen verändert und im ersten Schritt Mykorrhizapilze gefördert, was wiederum den Pflanzenwuchs stimuliert. Wenn durch die regelmäßige Anwendung von Biokohle-Wirtschaftsdüngern immer mehr Biokohle in den Boden kommt und sich daher aufgrund dessen hoher Stabilität immer mehr anreichert, werden damit auch der Kohlenstoffgehalt und die Bodenfruchtbarkeit langfristig erhöht.

Die Auswertung von über 150 Literaturstudien ergab bislang ausschließlich positive Wirkungen von Biokohle als Futterzusatz (max. 1 % der Ration, bzw. 50-200 g /GVE und Tag) [1]. Sie absorbiert Toxine und Umweltschadstoffe, fördert ein positives mikrobiologisches Milieu im Magen-Darmtrakt sowie die Tiergesundheit und steigert die Leistung.

Biokohle verbessert dabei auch die Qualität der Ausscheidungen – Geruch und Nährstoffverluste werden reduziert, die Trockenmasse wird erhöht. Diese positiven Wirkungen sowie Reduktionen von Methanemissionen wurden bei verschiedenen Nutztieren, inklusive Haustieren und Aquakulturen, nachgewiesen [2].

LITERATUR

[1] Schmidt, H. P., C. Kammann, A. Gerlach & H. Gerlach: Der Einsatz von Pflanzenkohle in der Tierfütterung, Ithaka-Journal, Arbaz, Switzerland, www.ithaka-journal.net/95, ISSN 1663-0521, pp. 364-394, 2016

[2] Toth, J.D. & Z. Dou: Use and impact of biochar and charcoal in animal production systems. In: Guo, M., He, Z. and Uchimiya, S.M. (eds.): Agricultural and Environmental Applications of Biochar. SSSA Special Publication 63, 199-224, 2016.

[14] Fa. Sonnenerde, Oberwarterstraße 100, 7422 Riedlingsdorf ; E-Mail: g.dunst@sonnenerde.at

8.5 BIOKOHLE ALS TORFERSATZ UND ZUR SUBSTRAT-/ ERDENPRODUKTION

(Gerald Dunst)[15]

Prinzipiell ist Biokohle als Substratbestandteil nur dann geeignet, wenn die Nährstoffe gleichzeitig möglichst immobilisiert und die Veränderung des pH-Wertes berücksichtigt werden. Die meisten Biokohlen sind alkalisch und bewegen sich in pH-Wert-Bereichen zwischen 8,5-10. Je nach Stabilität und Gesamt-Kohlenstoff-Gehalt müssen entsprechende N-Mengen vorhanden sein, um einer Immobilisierung entgegen zu wirken.

TORFERSATZ:

Mengenmäßig wird hier Biokohle nur eine geringe Rolle spielen, da dieses Produkt im Vergleich zu Torf teuer ist (120-150 €/m^3) und aufgrund der chemischen und physikalischen Eigenschaften nicht geeignet ist, als überwiegender Substratbestandteil verwendet zu werden. Für gärtnerische Kultursubstrate müssen nämlich einige Rahmenbedingungen erfüllt sein: ein nicht zu hoher pH, ein niedriger Salzgehalt, ein gleichbleibend pflanzenverträgliches Niveau an löslichen Nährstoffen, voraussehbare Festlegung und Freisetzung von Nährstoffen sowie ein gewisses Wasserspeicherungs- und Sorptionsvermögen [1]. Biokohle erfüllt diese Anforderungen an Substratausgangsstoffe jedoch nicht vollständig. Vorstellbar ist daher nur der Ersatz eines kleineren Anteils ($\leq$20 %) von Torf durch Biokohle, um den CO_2-Fußabdruck eines Torfprodukts zu verkleinern.

HERSTELLUNG VON SPEZIALSUBSTRATEN:

Nach der Entdeckung der Terra Preta gibt es einen regelrechten Boom und die unterschiedlichsten Rezepturen für die Herstellung von Biokohle hältigen Substraten. Die dabei eingesetzten Mengen bewegen sich im Bereich von 5-20 %. Eine „Aufladung“ der Biokohle mit Nährstoffen (vor allem Stickstoff), und eine „Aktivierung“ mit verschiedenen Mikroorganismen ist dabei fast immer ein wichtiger Verfahrensschritt. Häufig macht man dies schon während der Kompostierung, wobei die Kohle entweder zum Rottestart oder zumindest im frühen Rottestadium beigemengt wird.

In diesen Substraten dient die Kohle in erster Linie als Zwischenspeicher für verfügbare Nährstoffe. Die Versorgung der Pflanzen wird dadurch verbessert, gleichzeitig werden die Nährstoffverluste und der Ausstoß von klimarelevanten Gasen (insbesondere N_2O) reduziert [2].

Die Freie Universität Berlin optimiert in Zusammenarbeit mit dem Botanischen Garten Berlin derzeit eine Reihe von Pflanzsubstraten, welche auch den speziellen Ansprüchen nicht-heimischer Pflanzen genügen [3].

LITERATUR

[1] Meinken, E.: Biokohle als Torfersatzstoff in gärtnerischen Kultursubstraten. Analytische Aspekte. Terra-Boga-Workshop, Berlin; pp. 27-29, 23.-24.6.2015

[2] Saarnio, S.: Impacts of biochar amendment on greenhouse gas emissions from agricultural soil. In: Guo, M., He, Z. and Uchimiya, S.M. (eds.): Agricultural and Environmental Applications of Biochar. SSSA Special Publication 63, 259-293, 2016

---

[15] Fa. Sonnenerde, Oberwarterstraße 100, 7422 Riedlingsdorf ; E-Mail: g.dunst@sonnenerde.at

[3] Terytze, K.: Biokohle im Gartenbau – Verwertung von organischen Reststoffen zur Schließung von Energie- und Stoffkreisläufen. Berlin, Workshop 23.-24.6.2015,

8.6 BIOKOHLE ALS KOMPOSTBESTANDTEIL

(Gerald Dunst)[16]

Biokohle kann ein wertvoller und hocheffizienter Zuschlagstoff zur Kompostierung sein, und zwar bei nährstoffreichen Rohstoffen wie Bioabfall oder Klärschlamm. Während der Kompostierung werden durch die Zugabe von 5-20 % V/V Biokohle Verluste an Kohlenstoff und Stickstoff sowie störender Geruch und der Austritt von klimarelevanten Gasen reduziert. Mit Biokohle hergestellte Komposte sind nährstoffreicher und können die Produktionsleistung der damit gedüngten Pflanzen erhöhen. Nach der aktuellen Version der Kompostverordnung (Stand 04/2016) ist für die kommerzielle Kompostproduktion Biokohle als Zuschlagsstoff bei der Kompostierung derzeit allerdings nicht erlaubt und darf nur in der Eigenkompostierung für den Hausgebrauch angewendet werden.

8.7 BIOKOHLE IN DER BIOLOGISCHEN LANDWIRTSCHAFT

(Thomas Rech[17], Sylvia M. Schindecker[18])

Die biologische Landwirtschaft in Österreich wird seit dem Beitritt zur Europäischen Union 1995 durch EU-Verordnungen (derzeit gültig VO (EU) Nr. 834/2007 und 889/2008) geregelt. Da Biokohle nicht auf der Europäischen Positivliste der erlaubten Düngemittel, Bodenverbesserer und Nährstoffe (VO (EU) Nr. 889/08, Anhang I) gelistet ist, darf sie in der biologischen Landwirtschaft in der EU derzeit nicht eingesetzt werden.

Im Zuge der Verhandlungen zu einer neuen EU-Bio-Verordnung wird der Einsatz von Biokohle als Düngemittel(zusatz) bzw. Bodenverbesserer diskutiert, derzeit (Stand Sommer 2017) ist jedoch noch nicht abzusehen, wie die Diskussionen dazu ausgehen.

[16] Fa. Sonnenerde, Oberwarterstraße 100, 7422 Riedlingsdorf ; E-Mail: g.dunst@sonnenerde.at
[17] BMLFUW, Abteilung II/3, Stubenring 1, 1010 Wien; E-Mail: thomas.rech@bmlfuw.gv.at
[18] Landwirtschaftskammer Österreich, Schauflergasse 6, 1015 Wien; E-Mail: s.schindecker@lk-oe.at

9 BIOKOHLE IN DER FORSTWIRTSCHAFT

(Viktor J. Bruckman)[19]

OBWOHL DIE VORAUSSETZUNGEN für einen Einsatz von Biokohle in der Forstwirtschaft mitunter sehr günstig sind, gibt es bis jetzt nur sehr wenige praktische Beispiele. Einerseits ist genügend geeignete Biomasse für die Pyrolyse verfügbar, andererseits sind Topographie oder Substratqualität typischer Waldböden für den Feldbau ungeeignet und der positive Effekt der Bodenverbesserung damit potentiell größer. Holzige Biomasse eignet sich sehr gut für die Herstellung von qualitativ hochwertiger Biokohle wegen günstiger Faktoren, wie z.B. Kohlenstoffgehalt, Kationenaustauschkapazität, Konzentrationen von Mineralstoffen, Kohlenstoffsequestrierung und Aschegehalt. Eine verstärkte Nutzung von Biomasse aus dem Wald für die Herstellung von Biokohle kann der Waldbesitzer als Chance sehen, sein Einkommen zu diversifizieren. Dabei muss aber sichergestellt sein, dass eine verstärkte Biomasseproduktion nicht zu dauerhaftem Nährstoffentzug und anderen Nachteilen führt. International werden derzeit auch mobile Pyrolyseanlagen intensiv für den praxisnahen Einsatz getestet. Stationäre Anlagen können überschüssige Energie auskoppeln, die dann anderwärtig verwendet oder verkauft werden kann.

Biokohle kann auf intakten Waldstandorten nicht ohne erheblichen Aufwand und Risiken flächig in den Waldboden eingebracht werden. Daher erfolgt die flächige Ausbringung ähnlich den Vorgaben von Kalziumkarbonat (Kalkung). Die Ausbringung ist hier aber in der Regel punktuell und bezieht sich auf eine Einzelbaumbehandlung. Zu den Risiken einer Ausbringung von Biokohle im Wald zählen Kontamination (z.B. Schwermetalle, PAK, Dioxine), Staubbelastung bei einer flächigen Ausbringung am Waldboden und ein Verlust von organischer Substanz durch verstärkten mikrobiellen Abbau aufgrund einer Änderung der mikrobiellen Zusammensetzung. Um die Risiken zu minimieren, müssen Boden- und Standortszustand vor einer möglichen Ausbringung gründlich evaluiert werden.

POTENTIELLE EINSATZGEBIETE IN DER FORSTWIRTSCHAFT

- Erhöhung der Puffer- und Wasserhaltekapazität auf nährstoffarmen, sandigen Standorten
- Zusätzliche Kohlenstoffspeicherung
- Kurzumtrieb (Depotdünger, Reduktion von Treibhausgas-Emissionen)
- Bestandesverjüngung (Sicherung des Anwuchserfolges, Frostresistenz, Vitalität)
- Restaurierung von kontaminierten oder degradierten Standorten
- Einsatz in Quellschutzwäldern (Höhere Resilienz gegenüber Nährstoffauswaschung und folglich Grundwasserbelastung – birgt aber auch das Risiko einer zusätzlichen Kontamination)

[19] Austrian Academy of Sciences Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, 1010 Wien; E-Mail: viktor.bruckman@oeaw.ac.at

10 BIOKOHLE-ANWENDUNGEN AUSSERHALB DER LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT

(Benjamin Hupfauf, Marcel Huber)[20]

DIE WELTWEITE PRODUKTION an Biokohle in Form von Holzkohle betrug im Jahr 2005 ca. 44 Millionen Tonnen. Die durchschnittliche Ausbeute liegt abhängig von eingesetzten Verfahren bei ca. 20 Gewichtsprozent der verwendeten frischen Biomasse. Folglich wurde dafür eine Menge von ca. 220 Millionen Tonnen Biomasse benötigt. Der größte Anteil der Biokohle bzw. Holzkohle mit ca. 63 % stammt aus Afrika, wo die Produktion in den letzten Jahren nach wie vor stetig steigt. Die europäischen Länder spielen bei der Produktion von Biokohle bzw. Holzkohle eine untergeordnete Rolle, der größte europäische Hersteller ist Polen. Die geringe Produktionsleistung von Biokohle in Europa hängt vermutlich damit zusammen, dass der größte Anteil mit ineffizienten Erdmeilern produziert wird. Diese generieren erhebliche Luftemissionen weit oberhalb der gesetzlichen Emissionsgrenzen, weshalb diese Technologie in höher entwickelten Ländern nicht in großem Maßstab eingesetzt werden kann.

Die Anwendungsmöglichkeiten für Biokohle sind auch außerhalb der Land- und Forstwirtschaft (Schließung der Stoffkreisläufe) sehr vielfältig. So kann die Biokohle als Holzkohle oder Aktivkohle in der Metallurgie bei der Produktion von Roheisen und in der Stahlproduktion angewendet werden. Weiters kann sie in der Lebensmittelindustrie als Lebensmittelzusatzstoff (E153) oder Futtermittelzusatzstoff eingesetzt werden. Erwähnenswert dabei ist, dass in diesen Bereichen natürlich sehr hohe Qualitätsansprüche gefordert sind, denen sich verschiedene Normen widmen. Der Großteil der produzierten Biokohlen wird als Brennstoff zum Kochen oder als Grillkohle verwendet. Ferner gibt es sehr interessante Zukunftsmärkte für Biokohlen, beispielsweise bei der Behandlung von Luft und Wasser als „Aktivkohle“-Filter oder als Gärungszusatzstoff in Biogasanlagen. Ihre hohe Sorptionskraft macht Biokohle auch interessant, um Schadstoffe in kontaminierten Böden zu immobilisieren. Dadurch ist Biokohle eine – je nach Aufgabenstellung – aussichtsreiche Option für eine In-situ-Bodensanierung.

[20] MCI MANAGEMENT CENTER INNSBRUCK, Maximilianstrasse 2, 6020 Innsbruck/Österreich,
E-Mail: benjamin.hupfauf@mci.edu; marcel.huber@mci.edu

11 LITERATURÜBERBLICK FACHBÜCHER, REPORTS UND SAMMELPUBLIKATIONEN ZUM THEMA BIOKOHLE

ZUM THEMA BIOKOHLE sind in den letzten Jahren zahlreiche Fachartikel in referierten Wissenschaftsjournalen erschienen. Das Web of Science™ (Stand 30.11.2016) weist 3.326 Artikel mit Biokohle (biochar) als Schlagwort sowie 1.979 Artikel mit diesem Begriff im Titel aus. Dieser breite Fundus an Fachwissen und Versuchsergebnissen wurde in mehreren Fachbüchern zusammengefasst und wenn nötig ergänzt. Diese Publikationen geben einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand des Wissens, aber auch der nach wie vor bestehendenWissenslücken. Im Folgenden sind die relevantesten Fachbücher ohne Anspruch auf Vollständigkeit gelistet, deren Studium als Ergänzung zum vorliegenden Bericht empfohlen werden kann.

Bruckman, V.J., E. Apaydin-Varol, B.B. Uzun & J. Liu (Hrsg.): Biochar. A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation. Cambridge University Press, UK, 2016

Guo, M., Z. He & S.M. Uchimiya (Hrsg.): Agricultural and Environmental Application of Biochar. SSSA Special Publications 63. Soil Science Society of America, Madison, USA, 2016

Haubold-Rosar, M. et al.: Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer « veränderter » Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. Texte 04/2016. Umweltbundesamt, Dessau, 2016

Ladygina, N. & F. Rineau (Hrsg.): Biochar and Soil Biota. CRC Press, Boca Raton, 2013

Lehmann, J. & S. Joseph (Hrsg.): Biochar for Environmental Management. 2nd edition. Earthscan / Routledge, London, 2015

Quicker, P. und Weber , K. (Hrsg.): Biokohle: Herstellung, Eigenschaften und Verwendung von Biomassekarbonisaten. Springer Vieweg, 2017.

Ralebitso-Senior, T.K. & C. Orr (Hrsg.): Biochar Application. Essential Soil Microbial Ecology. Elsevier, Amsterdam, 2016

Ok, Y.S., S.M. Uchimiya, S.X. Chang & N. Bolan (Hrsg.): Biochar – Production, Characterization and Applications. CRC Press, Boca Raton, 2016

Shackley, S., G. Ruysschaert, K. Zwart & B. Glaser (Hrsg.): Biochar in European Soils and Agriculture. Earthscan / Routledge, London, 2016

Singh, B., Arbestain, M.C. and Lehmann, J. (eds.): Biochar: A Guide to Analytical Methods. Productivity Press / CRC Press, 2017

12 TEIL 2 – WISSENSCHAFTLICHE GRUNDLAGEN

12.1 HERSTELLUNG VON BIOKOHLE

12.1.1 BIOKOHLE-HERSTELLUNG AUS BIOMASSE-VERGASUNG

(Marcel Huber)[21]

Die Vergasung von Biomasse beschreibt jenen gestuften thermochemischen Umwandlungsprozess, bei dem ein fester, kohlenstoffhaltiger und damit zumeist biogener Ausgangsrohstoff, wie zum Beispiel Holz, in einen gasförmigen Brennstoff übergeführt wird. Das Hauptprodukt am Ende dieses speziellen Umwandlungsprozesses ist ein Produktgas, das dann sowohl im Bereich der erneuerbaren Kraftstoffherstellung als auch zur Strom- und Wärmeproduktion sowie vielem mehr genutzt werden kann.

Die Vergasung kommt dabei verfahrenstechnisch genau nach der Pyrolyse und noch vor der vollständigen Verbrennung. Biomasse muss also immer zuerst getrocknet und pyrolysiert werden, **bevor** sie vergast oder verbrannt werden kann. Die nachfolgende Darstellung zeigt diesen sequentiellen Ablauf.

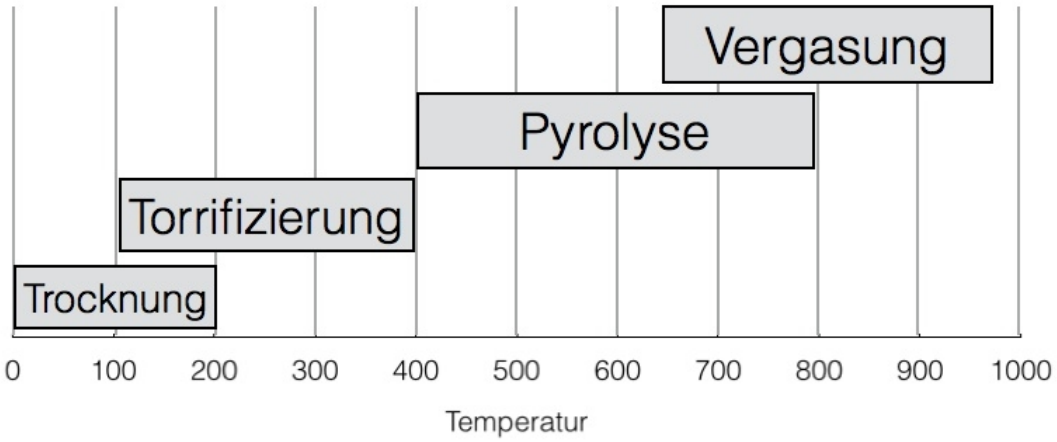

Abbildung 1: Sequentieller Ablauf bei der thermochemischen Umwandlung von Biomasse inkl. Temperaturbereiche (Quelle: G. Dunst)

Während bei der Verbrennung der Luftüberschuss im Prozess derart hoch gewählt wird, um einen vollständigen Ausbrand[22] des Brennstoffs zu gewährleisten, fällt bei der Vergasung eine Asche an, die je nach Ausgangsrohstoff und Prozessführung auch noch hohe Kohlenstoffanteile (bis zu 95 %) aufweisen kann. Damit wird diese Fraktion aus der Vergasung nicht mehr dem klassischen Begriff

[21] MCI MANAGEMENT CENTER INNSBRUCK, Maximilianstrasse 2, 6020 Innsbruck/Österreich; E-Mail: marcel.huber@mci.edu

[22] <5% TOC…

Asche gerecht. Vielmehr handelt es sich dabei um eine weitere Ausprägungsform von Biokohle bzw. Holzkohle, sofern als Ausgangsrohstoff Holz verwendet wurde.

Wie bei allen Arten der thermochemischen Verwertung spielen vor allem der eingesetzte Rohstoff als auch das gewählte Umwandlungsverfahren die entscheidenden Rollen, ob am Ende des Prozesses eine vorteilhafte Form (=PAK-arm) der Biokohle und somit ein wertvolles Nebenprodukt vorliegt oder aber ein entsorgungspflichtiger Reststoff bzw. Abfall. Ein wesentlicher Qualitätsparameter für die Verwertung / Anwendbarkeit für den Boden ist dabei, wie auch bei anderen Biokohleherstellungsverfahren, neben dem Kohlenstoffanteil und dem pH Wert vor allem die Belastung mit PAK[23].

Da entgegen dem Pyrolyseprozess bei der Vergasung das Hauptinteresse eher der Herstellung von Produktgas gilt, als der Biokohleproduktion, ist zurzeit noch nicht sichergestellt, dass sämtliche Biokohlen aus Vergasungsanlagen ausreichend niedrige PAK Werte nach ÖNORM S 2211-1 aufweisen.

Man kennt jedoch Anlagen und Verfahren nach dem Prinzip der gestuften Vergasung, die PAK-arme Biokohle produzieren. Nachfolgend die Prozessdarstellung eines derartigen Verfahrens.

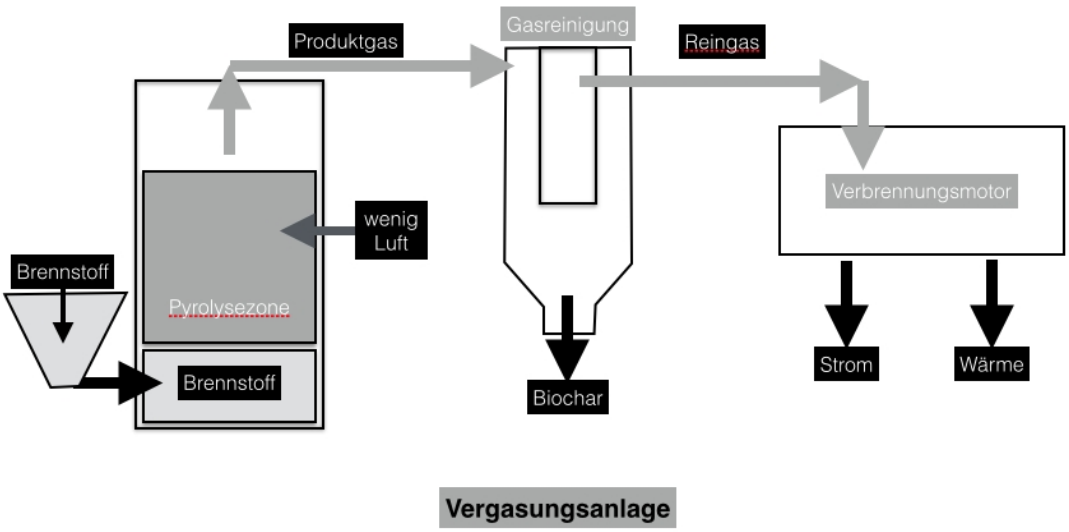

Abbildung 2: Schema einer gestuften Vergasung (Quelle: G. Dunst)

12.1.2 PYROLYSE ZUR HERSTELLUNG VON BIOKOHLE

Pyrolyse ist die thermische / thermochemische Zersetzung von biogenen Ausgangsstoffen bei erhöhten Temperaturen zwischen 400 und 600° C und ohne bzw. stark reduzierte Zugabe von Luft. Über Pyrolyseprozesse wird zurzeit der Großteil aller Biokohlen produziert.

Die für die Pyrolyse notwendige Temperatur kann entweder aus dem Brennstoff selbst durch Teilverbrennung (autotherm) gewonnen oder durch externe Energiequellen eingebracht werden (allotherm).

[23] Nachweis gemäß ÖNORM 15527

Weiters unterscheidet man zwischen einer schnellen und einer langsamen Pyrolyse. Von einer langsamen Pyrolyse spricht man bei einer Aufheizrate von ca. 1-10 Kelvin pro Sekunde (K/s) während bei der schnellen Pyrolyse auch bis zu 1000 K/s erreicht werden können. Entscheidend für eine möglichst vollständige Pyrolyse ist neben der Aufheizrate aber die Verweilzeit in der Pyrolysezone. Eine vollständige Pyrolyse ist die Grundvoraussetzung für die PAK-arme Biokohle. Es ist bekannt, dass bei mehr als 20 min Verweilzeit und Temperaturen über 600° C eine weitgehend vollständige Pyrolyse bei z.B. Waldhackgut stattfinden kann[1].

Im Wesentlichen können drei Systeme unterschieden werden, und zwar

1) der zumeist im Batch betriebene, geschlossene Festbettreaktor,

2) der kontinuierliche Schnecken- oder Trommelreaktor und

3) der einfache Batch-Reaktor mit offener Flamme. Bezogen auf die Trockensubstanz können aus den organischen Reststoffen rund 30 % Biokohle produziert werden.

1. Geschlossener Festbettreaktor:
   Dabei handelt es sich um einen Reaktor mit stehender Schüttung (Festbett), der meist im Batchbetrieb von oben befüllt und dann von unten oder oben entzündet wird. Es wird gerade so viel Luftsauerstoff zugeführt, dass das Material verschwelt (autotherme Pyrolyse). Die zurückbleibende Kohle wird entweder vor dem Entleeren oder unmittelbar danach mit Wasser gelöscht. Vorteile dieser Systeme sind die einfache Bauweise und die jahrzehntelange Erfahrung. Nachteil ist, dass meist nur gut stückiges Holz oder hochwertiges Holzhackgut als Rohstoff verwendet werden kann, der also relativ teuer ist.

2. Schnecken- oder Trommelreaktor:
   Der Schneckenreaktor ist ein neues kontinuierliches Verfahren, mit einem entsprechend luftdicht verschlossenen Einlass für den Rohstoff und einem Schneckenaustrag für die Kohle. Die Beheizung der Schnecke erfolgt je nach System elektrisch, mit Stützflammen an der Reaktoraußenseite oder mit den heißen Abgasen aus der anschließenden Verbrennung der Produktgase (allotherme Pyrolyse). Der große Vorteil dieser Technologie ist die Unempfindlichkeit gegenüber dem eingesetzten Brennstoff. Nachteil ist allerdings die aufwendige Technik für die Prozessführung, für Sicherheit und Emissionskontrolle.

3. Einfache Batch-Reaktoren mit offener Flamme:
   Diese wurden in erster Linie für Entwicklungsländer gebaut, um einerseits organische Reststoffe aus kleinbäuerlichen Betrieben gut verwerten zu können, und andererseits die täglichen Kocharbeiten emissionsärmer zu gestalten. Eines dieser einfachen Verfahren mit offener Flamme ist der „KonTiki-Reaktor“. Dabei wird der meist holzige Reststoff in einem kegelförmigen, nach unten geschlossenen Trichter in mehreren Schichten aufgetragen und entzündet. Sobald die ersten Anzeichen der Aschebildung sichtbar werden bzw. die offene Flamme als Zeichen für Abschluss der Pyrolyse erlischt, wird die nächste Schicht aufgelegt. Durch das oben liegende Feuer wird hier der gesamte Luftsauerstoff verbraucht und das darunter liegende, bereits verkohlte Material kann nicht weiter verbrennen. Die Schichten können so lange aufgelegt werden, bis der Trichter voll ist. Gestoppt wird dieser Prozess durch Überflutung des Reaktors mit Wasser.

Alle drei Verfahren eignen sich prinzipiell sehr gut für die Herstellung von hohen (PAK-armen) Kohlequalitäten.

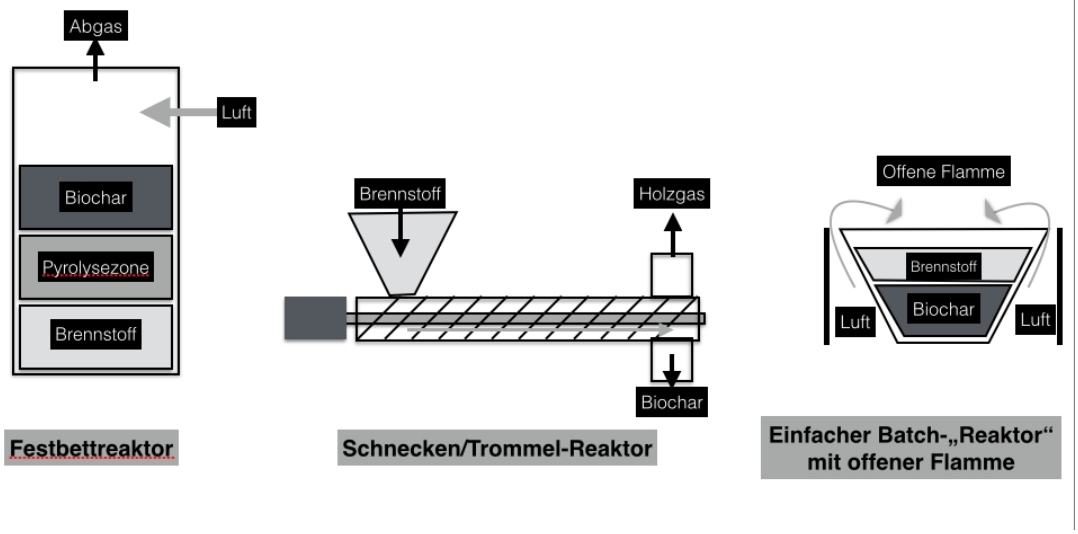

Abbildung 3: Möglichkeiten der pyrolytischen Herstellung von Biokohle (Quelle: G. Dunst)

LITERATUR

[1] Koidl F.R., M. B. Huber, A. Palatinus, A. A. Giovannini, J. Krueger, C. Roschitz & M. Kleinhappl: Impact of the pyrolysis-level on the product gas composition and -quality of multi-staged gasification systems, full paper & presentation at the 16th European Biomass Conference & Exhibition; Valencia, Spain, 06/2008

12.1.3 HTC-, VTC-TECHNOLOGIE ZUR KOHLENHERSTELLUNG

(Christoph Pfeifer)[24]

Die Hydrothermale Karbonisierung (HTC), auch als wässrige Verkohlung bezeichnet, ist ein Verfahren, das unter Temperaturen von 180 bis 250° C, autogenem Druck und unter Anwesenheit von Wasser aus organischem Material Biokohle produziert. In der einschlägigen Fachliteratur hat sich für Biokohle, die über HTC hergestellt wird, der Begriff Hydrokohle verfestigt. Wasser liegt bei den üblichen Prozessbedingungen im subkritischen Zustand vor, wodurch die Karbonisierung begünstigt wird. Der Prozess wurde bereits 1913 von Friedrich Bergius formuliert, wofür er unter anderem 1931 den Nobelpreis für Chemie erhielt. Dieser Prozess wird aber erst in der letzten Dekade intensiv beforscht.

[24] Institut für Verfahrens- und Energietechnik (IVET) , Muthgasse 107/I, 1190 Wien; E-Mail: christoph.pfeifer@boku.ac.at

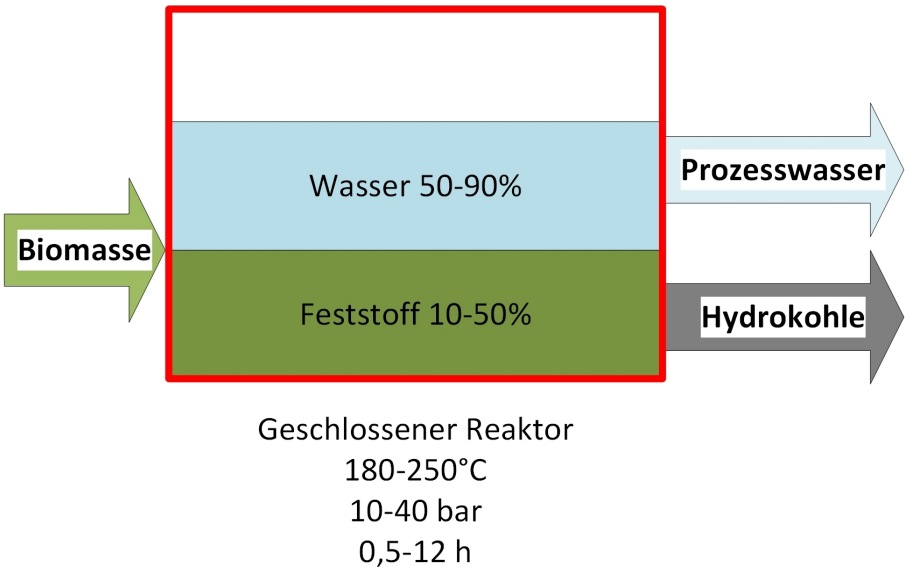

Abbildung 4: Schema eines Reaktors zur hydrothermalen Karbonisierung mit den Anschlüssen zur Druck- und Temperaturkontrolle

Bei der Karbonisierung werden sauerstoff- und wasserstoffreiche Verbindungen abgereichert und dadurch der Kohlenstoffanteil in der Hydrokohle im Vergleich zum Ausgangsmaterial erhöht. Die abgereicherten Verbindungen finden sich im Wesentlichen im sogenannten Prozesswasser sowie zu geringen Anteilen im entstehenden Prozessgas wieder. Das Produkt Hydrokohle ist hydrophober als das Ausgangsmaterial und die Entwässerung gestaltet sich weniger energieintensiv als die Entwässerung der Biomasse. Darüber hinaus laufen wesentliche Reaktionen exotherm ab und bei der Karbonisierung wird, nach anfänglicher Energiezufuhr, Wärmeenergie frei. Durch den erhöhten Kohlenstoffanteil steigt der Brennwert/Heizwert der Hydrokohle. Durch die hydrothermale Karbonisierung von Klärschlamm werden pathogene Bakterien und andere Erreger abgetötet. Forschungsbedarf ist noch gegeben im Bereich der Reduktion von Verunreinigungen und in der Anreicherung von Nährstoffen in der Hydrokohle. Die Verteilung von Nährstoffen zwischen der festen, flüssigen und gasförmigen Phase kann über die Prozessbedingungen (Druck, Temperatur, Verweilzeit, Aufheizrate, pH-Wert, …) eingestellt werden. Die Prozessbedingungen können so reguliert werden, dass sich der Phosphor großteils im Prozesswasser befindet. Durch das Struvitverfahren kann er dann dem Prozesswasser entzogen und als Dünger ausgebracht werden.

Die Karbonisierung wird in der Literatur der hydrothermalen (HTC) und vapothermalen (VTC) Prozessführung zugeordnet. Bei der hydrothermalen Variante befindet sich das Wasser im Reaktor im Wesentlichen im flüssigen Zustand, wofür der Druck im Reaktionsraum deutlich über jenem der Sättigungstemperatur liegen muss. Bei der vapothermalen Variante ist das Wasser im Wesentlichen dampfförmig. Im Übergangsbereich spricht man unter anderem auch von der vapohydrothermalen Karbonisierung (VHTC). Zum derzeitigen Stand der Forschung ist noch nicht eindeutig klar welche Prozessführung zu bevorzugen ist. Einerseits hat Wasserdampf eine geringere Viskosität als flüssiges Wasser und kann daher leichter in die porösen Strukturen der Biomasse eindringen. Andererseits bietet flüssiges Wasser den Vorteil einer höheren Wärmekapazität und ermöglicht somit einen deutlich gesteigerten Wärmeübergang zwischen dem Prozessmedium und der Biomasse.

Hydrokohle kann in drei verschiedenen Varianten entstehen: Batchverfahren in Autoklaven, Multi-batchverfahren (semi-kontinuierlich) mit Autoklaven in Serie sowie kontinuierliche Verfahren.

Die frühen Umsetzungen des HTC-Verfahrens verwendeten ausschließlich Autoklaven und eine diskontinuierliche Prozessführung. Ein Zyklus dauert von zwei bis drei Stunden bis zu maximal zwölf Stunden, in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial und der gewünschten Kohlequalität. Bei den meisten umgesetzten Prozessen wird die Suspension im Reaktorraum entweder mit Rührern oder durch Dampfeindüsung umgewälzt.

Alternativ dazu wird die Prozessführung anhand von Multi-batch-Reaktoren implementiert. Hierzu wird die Suspension zeitlich aufeinanderfolgend in mehrere Autoklaven geleitet und ähnlich wie bei modernen Biogasanlagen eine mittlere Verweilzeit der Biomassepartikel im System gewährleistet. Die Forschung zielt aber mittelfristig auf eine kontinuierliche Prozessführung ab, wobei hier zumeist die Details zur Verfahrensführung nicht verfügbar sind. Es werden unter anderem Schneckenreaktoren, Rohrreaktoren, zweistufige Gegenstromreaktoren, Kolonnen ohne Details zu den Einbauten vorgeschlagen sowie teilweise bereits kommerziell eingesetzt. Im Rahmen des Projektes NEWAPP wird der Biomüll in Valencia, Spanien, kontinuierlich karbonisiert, wobei hier keinerlei Informationen über den Reaktor verfügbar sind.

Auch Hydrokohle kommt zur Brennstoffvorbereitung für Verbrennungsprozesse sowie für den Einsatz als Bodenhilfsstoff in Frage. Für Biokohle aus Pyrolyseprozessen wurden bereits lange Aufenthaltszeiten im Boden nachgewiesen. Für Hydrokohle steht dieser Nachweis noch aus. Für Reststoffströme mit hohen Wassergehalten (>50 Gewichtsprozent) bietet die hydrothermale Karbonisierung Vorteile wegen der exothermen Verfahrensführung und dem Wegfallen einer Trocknung vor der Umwandlung.

12.1.4 KOHLEN AUS NICHT REIN PFLANZLICHEN AUSGANGSSTOFFEN

(Gerald Dunst)[25]

Prinzipiell kann jeder kohlenstoffhältige Rohstoff verkohlt werden. Da es sich bei der Pyrolyse um einen Stoffumwandlungsprozess handelt, können die verwendeten Ausgangsstoffe meist nicht rückverfolgt werden. Ob die aufgelisteten Beispiele noch unter dem Begriff „Biokohle“, „Kohle“ oder unter typenspezifischen Bezeichnungen subsummiert werden sollen, bleibt zu diskutieren.

SIEBRESTE AUS DER KOMPOSTIERUNG:

Nach Reinigung der Siebreste mittels Steinabscheider und Windsichter können immer noch geringfügige Verunreinigungen mit Kunststoff enthalten sein. Zu über 99 % besteht dieser Siebrest aber aus nicht zersetztem Holz und stellt somit einen idealen Rohstoff für die Verkohlung dar. Der enthaltene Restkunststoff wird dabei zur Gänze und rückstandsfrei zu Energie umgewandelt und es entsteht eine sehr hochwertige Kohle, die wieder dem Kompostierungsprozess zugeführt werden und damit die Kompostqualität steigern könnte.

TETRAPACK:

Die Pyrolyse kann zur Stofftrennung und Stoffumwandlung dieses Verbundstoffes genutzt werden: Polyethylen wird in Gas umgewandelt, aus dem Karton wird Biokohle und das Aluminium kann abgetrennt werden. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt in der Herstellung von gleichzeitig zwei hochwertigen Produkten, nämlich Aluminium und Biokohle.

---

[25] Fa. Sonnenerde, Oberwarterstraße 100, 7422 Riedlingsdorf ; E-Mail: g.dunst@sonnenerde.at

WINDELN:

Die Hauptmasse der Windeln besteht aus Zellulosefasern, die in Kombination mit den enthaltenen Ausscheidungen eine gut einsetzbare, nährstoffreiche Kohle ergeben würden. Die enthaltenen Folien könnten auch in diesem Beispiel energetisch genutzt werden. Es handelt sich also auch hier um ein Stofftrennungs- und Verwertungsverfahren mit dem Ziel einer bestmöglichen stofflichen Nutzung.

KLÄRSCHLAMM:

Klärschlamm kann ohne zusätzliche Energieträger verkohlt werden; dabei empfiehlt sich ein Energiegehalt über 10 MJ kg^{-1}, was bei gut ausgefaulten Schlämmen meist der Fall ist. Das Endprodukt aus der Niedertemperatur-Pyrolyse (400 bis 500° C) könnte als fertiger Kohle-Phosphordünger (bis zu 20 % P_2O_5 und bis zu 20 % C) mit sehr hohen Verfügbarkeiten des Phosphors eingesetzt werden.

KNOCHEN, HORN:

Im Englischen auch gerne als „ABC = animal bone char“ bezeichnet, ist dieser Rohstoff tierischen Ursprungs – also Knochen oder Horn. Das Fertigprodukt enthält lediglich 10 % Kohlenstoff, aber rund 30 % P_2O_5 und 40 % CaO. Es handelt sich hierbei in erster Linie um einen Ca-P-Dünger mit Aufwandsmengen von 0,1-1,0 t/ha.

GÄRRÜCKSTÄNDE AUS BIOGASANLAGEN:

Da die festen Gärrückstände aus Biogasanlagen vorwiegend aus Lignin- und Zellulosefasern bestehen, die in der Biogasanlage selbst nicht abgebaut werden können, handelt es sich dabei prinzipiell um einen tauglichen Rohstoff. Aufgrund des hohen N-Gehaltes entstehen trotz der 50 %igen Verluste während der Pyrolyse sehr nährstoffreiche Kohlen, die zusätzlich mit der Flüssigphase des Gärrestes gelöscht werden können und damit einen hochwirksamen Dünger darstellen würden.

12.1.5 WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG: KOSTEN-EFFEKTIVITÄTS-ANALYSE

(Michaela Klinglmüller, Stefan Höltinger & Erwin Schmid) [26]

Die Sensitivität der Treibhausgas-Vermeidungskosten gegenüber unsicheren Daten wurde mit einer Monte-Carlo-Simulation ermittelt. Um den Einfluss der Datenunsicherheit darzustellen, wurden die Elastizitäten mit Hilfe eines Regressionsmodells geschätzt [1, 2].

[26] Universität für Bodenkultur, Institut für Nachhaltige Wirtschaftsentwicklung, Feistmantelstr. 4, 1180 Wien; E-Mail: michaela.klinglmueller@gmail.com

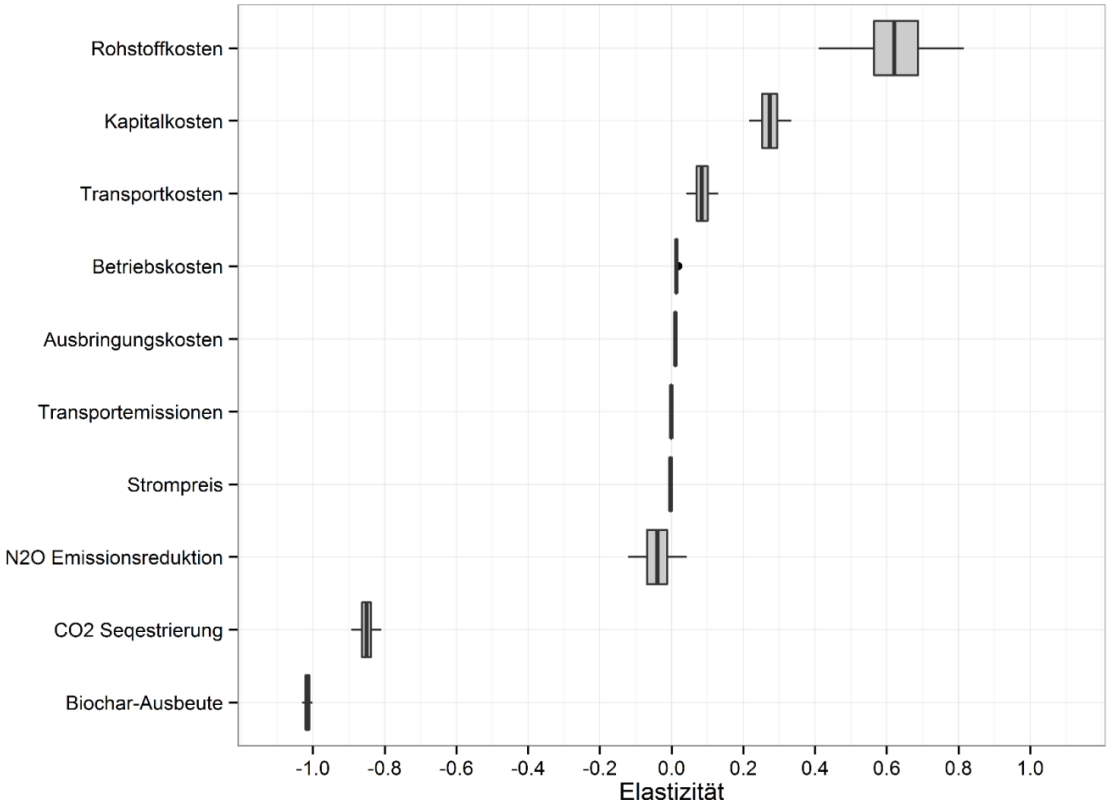

Abbildung 5: Einflussfaktoren auf die THG-Vermeidungskosten von Biokohle. Die Boxplots zeigen die Elastizitäten zwischen den THG-Vermeidungskosten und den berücksichtigten Einflussfaktoren für eine Anlage mittlerer Größe (Kapazität von 16.000 t Biomasse a-1) mit langsamer Pyrolyse.(Quelle: [3]Bruckmann et al., 2016)

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse zeigen, dass die Biokohle-Ausbeute, die CO_2 Sequestrierung, die Rohstoffkosten und die Kapitalkosten die ausschlaggebenden Faktoren für die Wirtschaftlichkeit von Biokohle als Treibhausgas-Vermeidungsmaßnahme sind. Die Elastizitäten geben an, um wie viel Prozent sich die Treibhausgas-Vermeidungskosten bei einer einprozentigen Änderung eines Einflussfaktors ändern. Den größten Einfluss hat die Biokohle-Ausbeute der eingesetzten Produktionsverfahren: wenn diese um 1 % steigt, sinken die THG-Vermeidungskosten im Durchschnitt um etwas mehr als 1 %. Bei einer einprozentigen Erhöhung der CO_2-Sequestrierung fallen die Treibhausgas-Vermeidungskosten um durchschnittlich 0,8 % geringer aus.

Bei den ökonomischen Faktoren haben die Rohstoffkosten den größten Einfluss. Wenn diese um 50 % steigen, was im Bereich der angenommenen Schwankungsbreite liegt, steigen die THG-Vermeidungskosten durchschnittlich um etwa 30 %. Deshalb ist die Verfügbarkeit günstiger Biomasserohstoffe entscheidend, ob Biokohle eine kosteneffektive THG-Reduktionsmaßnahme darstellen kann. Bisher stellen andere THG-Vermeidungsmöglichkeiten wie Aufforstungen, konservierende Bodenbearbeitungsverfahren oder die CO_2-Abscheidung und Speicherung im Energiesektor günstigere Maßnahmen dar. Die Kosten dafür liegen zwischen 15 und 80 € t^{-1} CO_2e [4, 5]. Für eine vollständige Bewertung der Wirtschaftlichkeit von Biokohle als THG-Vermeidungsmaßnahme müssen auch potentiell positiver Nebeneffekte, wie die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, berücksichtigt werden.

LITERATUR

[1] Höltinger, S., J. Schmidt, M. Schönhart & E. Schmid: A spatially explicit techno-economic assessment of green biorefinery concepts. Biofuels, Bioprod. Bioref 8, 325–341. doi:10.1002/bbb.1461, 2014

[2] Schmidt, J., S. Leduc, E. Dotzauer, G. Kindermann & E. Schmid: Cost-effective CO2 emission reduction through heat, power and biofuel production from woody biomass: A spatially explicit comparison of conversion technologies. Applied Energy 87, 2128–2141. doi:doi: 10.1016/j.apenergy.2009.11.007, 2010

[3] Bruckman, V., Klinglmüller, M., & Milenković, M. (2016). Biochar in the View of Climate Change Mitigation: The FOREBIOM Experience. In V. Bruckman, E. Apaydın Varol, B. Uzun, & J. Liu (Eds.), *Biochar: A Regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation* (pp. Xv-Xviii). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781316337974.002

[4] Finkenrath, M.: Cost and performance of carbon dioxide capture from power generation, 2011

[5] Nabuurs, G.J., O. Masera: Forestry, in: Metz, B, Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R. & Meyer, L.A. (eds.): Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 541–584, 2007

12.2 PHYSIKALISCH-CHEMISCHE EIGENSCHAFTEN VON BIOKOHLE

12.2.1 BIOKOHLE ALS BODENHILFSSTOFF – PHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN

(Franz Zehetner)[27]

Biokohle kann je nach Ausgangsmaterial und Prozessparametern bei der Herstellung (Pyrolyse) sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Im Allgemeinen haben Biokohlen hochporöse Strukturen im Nano- und Mikrometerbereich (s. elektronenmikroskopische Aufnahme) und können je nach Pyrolysetemperaturen z.T. sehr hohe spezifische Oberflächen aufweisen; entsprechend der hohen Porosität von Biokohlen ist deren Lagerungsdichte meist sehr gering [1].

[27] Institut für Bodenforschung, Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien; E-Mail: franz.zehetner@boku.ac.at

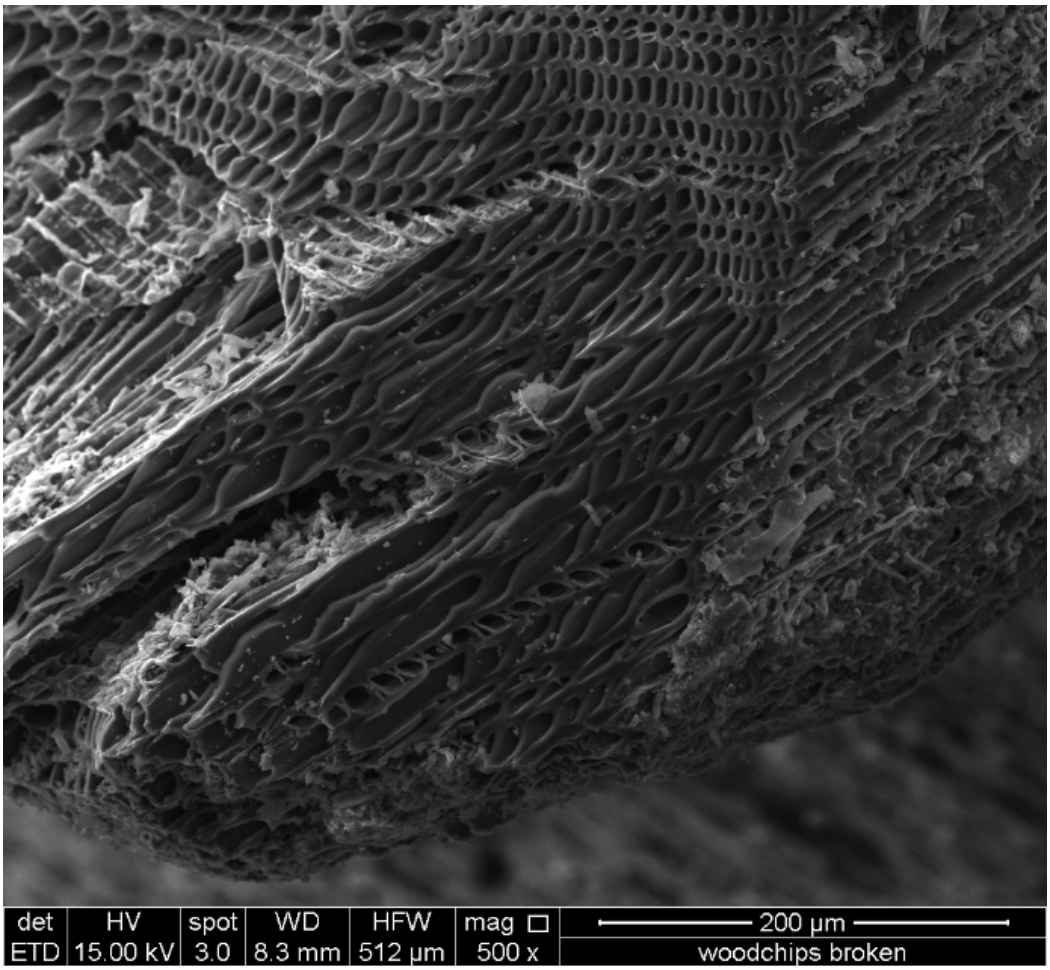

Abbildung 6: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Biokohle (Quelle: Franz Zehetner)

Wenn Biokohle in den Boden eingebracht wird, sind – entsprechend der oben genannten Eigenschaften – direkte Effekte auf bodenphysikalische Parameter zu beobachten [2, 3]. So hat sich beispielsweise gezeigt, dass durch Biokohle-Zugabe die Porosität von Böden und deren Wasserhaltekapazität (v.a. bei sandigen Böden) aber auch die Wasserpermeabilität und Belüftung (v.a. bei tonigen Böden) erhöht werden können während sich Lagerungsdichte und Eindringwiderstand verringern können [4-8]. Andererseits kann das Einbringen frisch pyrolysierter Biokohlen in den Boden auch hydrophob (wasserabweisend) wirken: zerfallende Biokohle-Partikel können bestehende Bodenporen verstopfen und somit die Wasserhaltkapazität und Wasserpermeabilität verringern [8, 9]. Biokohlen färben Böden meist dunkler und verringern dadurch die Albedo, was die Erwärmung von Böden fördert [8].

Mit dem Einbringen von Biokohle kann die Struktur- und Aggregatstabilität von Böden mit sehr unterschiedlichen Texturen (außer sehr sandige Böden) nachweislich verbessert werden [8, 10]. Als direkter Effekt des Einbringens von Biokohle erhöhen sich die Salzgehalte (zumindest kurzzeitig), was die Flockungsneigung steigert. Indirekt begünstigt Biokohle verschiedene strukturbildende bzw. -stabilisierende Prozesse.

Solche Prozesse bedeuten: die Habitatbedingungen für Bodenmikroorganismen werden verbessert [11, 12], die Biokohle verbindet sich mit der bodenorganischen Substanz zu stabilen Aggregaten [13, 14] oder das Pflanzenwachstum wird verbessert und dadurch die Rhizosphären-Effekte gesteigert [15].

Indem Biokohle die Infiltrationsraten und die Wasserhaltekapazität erhöht, könnte sie auch dazu beitragen, dass Oberflächenabfluss und Bodenerosion verringert werden [8]. Bis dato liegen aber kaum experimentelle Daten dazu vor. Biokohle selbst könnte durch die geringe Lagerungsdichte einer potentiellen Bodenverdichtung entgegenwirken [8]; gesicherte experimentelle Daten dazu gibt es jedoch kaum.

LITERATUR

[1] Downie, A., A. Crosky & P. Munroe: Physical properties of biochar. In: Biochar for Environmental Management - Science and Technology (eds: J. Lehmann & S. Joseph), Earthscan, London, UK, pp. 13-32, 2009

[2] De Melo Carvalho, M.T., Maia, A. de Holanda Nunes, B. e. Madari, . Bastiaans, P. A. J. van Oort, A. B. Heinemann, M. A Soler da Silva, F. A. Petter,B. H. Marimon Jr. & H. Meinke, H.: Biochar increases plant-available water in a sandy loam soil under an aerobic rice crop system. *Solid Earth*, Vol. 5, 939 – 952; 2014

[3] Peake, L. R., B. J. Reid & X. Tang: Quantifying the influence of biochar on the physical and hydrological properties of dissimilar soils. *Geoderma*, 235 - 236, 182 – 190, 2014

[4] Atkinson, C. J., J. D. Fitzgerald & N. A. Hipps: Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. Plant and Soil, 337 (1), pp. 1-18, 2010

[5] Basso, A. S., F. E. Miguez, D. A. Laird, R. Horton & M. Westgate: Assessing potential of biochar for increasing waterholding capacity of sandy soils. *Global Change Biology Bioenergy*, vol. 5, 132 – 143, 2013

[6] Githinji, L.: Effect of biochar application rate on soil physical and hydraulic properties of a sandy loam. Archives of Agronomy and Soil Science, 60 (4), pp. 457-470, 2014

[7] Kammann, C. I., S. Linsel, J. W. Gößling & H.-W. Koyro: Influence of Biochar on drought tolerance of *Chenopodium quinoa*: Wild and on soil–plant relations. *Plant and Soil,* Vol. 345, 195 – 210, 2011

[8] Verheijen, F., S. Jeffery, A. C. Bastos, M. van der Velde & I. Diafas: Biochar Application to Soils - A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. JRC Scientific and Technical Report, Office for the Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2010

[9] Mukherjee, A., & R. Lal.: The biochar dilemma. *Soil Research*, 52, 217-230, 2014

[10] Gul, S., J. K. Whalen, B. W. Thomas, V. Sachdeva & H. Deng: Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. Agriculture, Ecosystems and Environment, 206, pp. 46-59, 2015

[11] Pietikainen, J., O. Kiikkila & H. Fritze: Charcoal as a habitat for microbes and its effect on the microbial community of the underlying humus. *Oikos*, Vol. 89, 231-242, 2000

[12] Van Zwieten, L., S. Kimber, S. Morris, K. Chan, A. Downie, J. Rust, S. Joseph & A. Cowie: Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant and Soil*, Vol. 327, 235-246, 2009

[13] Lehmann, L., M. C. Rillig, J. Thies, C. A. Masiello, W. C. Hockaday & D. Crowley: Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology & Biochemistry*, Vol. 43, 1812-1836, 2011

[14] Fletcher, A. J., M. A. Smith, A. Heinemeyer, R. Lord, C. J. Ennis, E. M. Hodgson & K. Farrar: Production Factors Controlling the Physical Characteristics of Biochar Derived from Phytoremediation Willow for Agricultural Applications. *Bioenergy Research*, Vol. 7, 371-380, 2014

[15] Joseph, S. D., K. M. Camps-Arbestain, Y. Lin, P. Munroe, C. H. Chia, J. Hook, L. van Zwieten, S. Kimber, A. Cowie, B. P. Singh, J. Lehmann, N. Foidl, R. J. SmernikI & J. E. Amonette: An investigation into the reactions of biochar in soil. *Australian Journal of Soil Research*, Vol. 48, 501-515, 2010

12.2.2 SORPTION VON ORGANISCHEN SCHADSTOFFEN

(Gabriel Sigmund, Thorsten Hüffer, Thilo Hofmann)[28]

Biokohle weist je nach Ausgangsmaterial und Produktionsbedingung sehr verschiedene Eigenschaften auf. Bei der Pyrolyse kann Biokohle mit graphenähnlichen Kohlenstoffgerüsten entstehen, welche durch hohe spezifische Oberflächen und Porenvolumen charakterisiert ist. Hierdurch bietet sind ein möglicher Einsatz von Biokohle zur Immobilisierung von organischen Schadstoffen an. Dieser wurde bereits in einigen Studien untersucht. Die meisten Untersuchungen wurden dabei mit schadstoffbelasteten Wasser oder Flusssedimenten durchgeführt, während nur vereinzelte Ergebnisse für die Sanierung von belasteten Böden vorhanden sind [1-4].

Das Sorptionsverhalten von Biokohle für ungeladene organische Schadstoffe wird von wassermeidenden Wechselwirkungen und spezifischen Wechselwirkungen mit dem Kohlenstoffgerüst der Biokohlen bestimmt. Wichtig sind dabei sogenannte Donor-Akzeptor Wechselwirkungen zwischen Elektronen der Biokohleoberfläche und der organischen Schadstoffe [5, 6]. Starke Sorption zeigten diesbezüglich unter anderem polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Biphenyle (PCB), Dichlordiphenyltrichlorethan (DDT), polychlorierte Dibenzo-p-dioxine (PCDD) und Dibenzofurane (PCDF) [1, 2]. Untersuchungen von Hofmann et al. haben zudem gezeigt, dass Bindungen von ungeladenen organischen Schadstoffen an kohleartige Substrate sehr dauerhaft sind [7].

Seit den 2010er Jahren wurde vermehrt auch die Sorption verschiedener Farbstoffe, Antibiotika, und Pestizide untersucht. Im Unterschied zu den zuvor genannten sind viele dieser Schadstoffe polare oder ionisierbare Verbindungen, welche ihr Sorptionsverhalten in Abhängigkeit von pH-Wert und Ionenstärke ändern. Die Wechselwirkungen dieser Schadstoffe können durch zusätzliche Mechanismen, wie z.B. elektrostatische Wechselwirkungen und die Bildung von Wasserstoffbrücken, wesentlich beeinflusst werden [8, 9]. Das Sorptionsverhalten von polaren und ionisierbaren Schadstoffen ist daher schwieriger zu schätzen als ungeladene Schadstoffe. Jedoch deuten erste Ergebnisse auch hier auf ein hohes Sorptionspotential bestimmter Biokohlen für diese Schadstoffe hin [2, 9].

[28] Universität Wien, Department Umwelt-Geowissenschaften, Althanstraße 14 / UZAII, 1090 Wien
E-Mail: gabriel.sigmund@univie.ac.at

Im Vergleich zu Aktivkohle ist die Sorption von organischen Schadstoffen an Biokohle zwar tendenziell schwächer [3, 10], Biokohle ist jedoch in der Produktion kosteneffizienter, ressourcenschonender und trägt als mögliche Kohlenstoffsenke zusätzlich positiv zur Umweltbilanz von Sanierungsmaßnahmen bei [11]. Um das Sorptionspotential bei stärkeren Kontaminationen weiter zu steigern, ist die Herstellung von Aktivkohle durch chemische oder physikalische Aktivierung der Biokohle denkbar. Dadurch wird die Produktion ähnlich aufwendig und kostenintensiv wie die Aktivkohlenproduktion aus fossilen kohleartigen Substraten, ist im Vergleich jedoch ressourcenschonender und klimafreundlicher [12]. Aus einer umfassenden Perspektive birgt die Verwendung von Biokohle im Vergleich zu Aktivkohle daher insbesondere ökonomische und ökologische Vorteile bei der Behandlung geringer bis moderater Verunreinigungen.

Biokohle, welche in den Ackerboden eingebracht wird, um dessen pH Wert und/oder Wasserhaltekapazität zu steigern, kann als Nebeneffekt durch dessen hohes Sorptionspotential das Grundwasser vor Verunreinigungen schützen. Das hohe Sorptionspotential kann jedoch auch problematisch sein, wenn Herbizide bei der Vorauflauf-Anwendung an biokohlebehandelten Boden sorbieren und dadurch in ihrer Wirksamkeit beeinträchtigt werden. Infolgedessen könnten höhere Aufwandmengen nötig sein, um den erwünschten Pflanzenschutz zu erreichen, was unter Umständen zu höheren Risiken für die menschliche Gesundheit und Umwelt führt [13].

Zusammenfassend kann Biokohle in Wasser, Boden und Sediment eingesetzt werden, um das Risiko durch Immobilisierung von Schadstoffen zu reduzieren. Bezüglich des sanierenden Einsatzes von Biokohle bleiben aber noch Forschungsfragen offen, die das Sorptionspotential von Biokohle in verschiedenen Böden betreffen und wie sich die Alterung von Biokohle auf dessen Eigenschaften auswirkt.

LITERATUR

[1] Beesley, L. & E. Moreno-Jiménez: A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environ. Pollut.* **159,** 3269–3282, 2011

[2] Ahmad, M. *et al.*: Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: a review. *Chemosphere* **99,** 19–33, 2014

[3] Rakowska, M. I., D. Kupryianchyk, J. Harmsen, T. Grotenhuis & A. A. Koelmans: In situ remediation of contaminated sediments using carbonaceous materials. *Env. Toxicol. Chem.* **31,** 693–704, 2012

[4] Mohan, D., A. Sarswat, Y. S. Ok, C. U. Pittman & C. U. Pittman Jr.: Organic and inorganic contaminants removal from water with biochar, a renewable, low cost and sustainable adsorbent - A critical review. *Bioresour. Technol.* **160,** 191–202, 2014

[5] Zhu, D. Q. & J. J. Pignatello: Characterization of aromatic compound sorptive interactions with black carbon (charcoal) assisted by graphite as a model. *Env. Sci. Technol.* **39,** 2033–2041,2005

[6] Moreno-Castilla, C.: Adsorption of organic molecules from aqueous solutions on carbon materials. *Carbon* **42,** 83–94, 2004

[7] Yang, Y., T. Hofmann C. Pies & P. Grathwohl: Sorption of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to carbonaceous materials in a river floodplain soil. *Env. Pollut.* **156,** 1357–1363, 2008

[8] Kah, M. & C. D. Brown: Adsorption of ionisable pesticides in soils. *Rev. Env. Contam. Toxicol.* **188,** 149–217, 2006

[9] Inyang, M. & E. Dickenson: The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. *Chemosphere* **134,** 232–240, 2015

[10] Oleszczuk, P., S. E. Hale, J. Lehmann & G. Cornelissen: Activated carbon and biochar amendments decrease pore-water concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sewage sludge. *Bioresour. Technol.* **111,** 84–91, 2012

[11] Lehmann, J. & S. Joseph: *Biochar for Environmental Management*. *Sci. Technol.* **1,** 449, earthscan, 2009

[12] Amstaetter, K., E. Eek & G. Cornelissen: Sorption of PAHs and PCBs to activated carbon: coal versus biomass-based quality. *Chemosphere* **87,** 573–8, 2012

[13] Kookana, R. S.: The role of biochar in modifying the environmental fate, bioavailability, and efficacy of pesticides in soils: a review. *Aust. J. Soil Res.* **48,** 627–637, 2010

12.2.3 SORPTION VON SCHWERMETALLEN UND METALLOIDEN

(Gerhard Soja, Wolfgang Friesl-Hanl)[29]

Schwermetalle und Metalloide wie z.B. As können sich auf Grund geogener Bedingungen oder durch industrielle Aktivitäten (Bergbau, Erzverarbeitung, metallverarbeitende Industrie, Abfalllagerung) in Böden und Sedimenten anreichern. Zwar sind einige Elemente als Mikronährstoffe für Pflanzen essentiell (z.B. Cu, Ni, Zn), doch in erhöhten Konzentrationen überwiegen deren toxischen Wirkungen.

Bei Kontaminationen werden die Rezeptoren (Bodenorganismen, Pflanzen) dann beeinträchtigt, wenn der Schadstoff als Kontaminationsquelle über den Kontaminationspfad, z.B. die Bodenlösung, an den Rezeptor gelangt und von diesem aufgenommen werden kann. Da Schwermetalle und Metalloide nicht so wie organische Schadstoffe abgebaut werden und die Rezeptoren nicht einfach von der Bodenmatrix isoliert werden können, stellt die Unterbindung des Kontaminationspfades eine potentielle Lösung dar, um das Risikos am Pfad Schadstoffquelle-Schadstoffübertragung-Rezeptor zu reduzieren [1, 2].

An dieser Stelle kommt das Sorptionsvermögen von Biokohle ins Spiel. Als organische Matrix kann Biokohle Schwermetalle immobilisieren und dadurch ihre Bioverfügbarkeit verringern. Damit wird die Übertragung von Schadstoffen zum Rezeptor (z.B. Tier, Mensch) verringert. Diese Fähigkeit wird durch verschiedene physikalisch-chemische Bindungsmechanismen erreicht, die durch die spezifischen Eigenschaften von Biokohle ermöglicht werden. Zu dem (im Vergleich zu nicht verkohltem Material) ausgeprägtem Sorptionsvermögen tragen die hohe spezifische Oberfläche, die hohe Kationenaustauschkapazität und die lange Verweilzeit von Biokohle im Boden bei [3]. Die Oberflächen von Biokohle können aber auch schon während der Pyrolyse oder durch Nachbehandlung des Produktes mit Reagenzien oder durch künstliche Alterung modifiziert werden, um ein besseres Bindungsvermögen bei speziellen Einsatzzwecken zu erzielen [4, 5].

---

[29] Energy Department, Environmental Resources and Technologies, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Konrad Lorenz-Str. 24, 3430 Tulln; E-Mail: gerhard.soja@ait.ac.at

DIREKTE WECHSELWIRKUNGEN VON BIOKOHLE MIT SCHWERMETALLEN

Chemische Sorption: Bei hohen Temperaturen (>500° C) frisch produzierte Biokohle hat anfangs wenige funktionelle Gruppen an der Oberfläche. In der Folge werden durch Reaktionen mit dem Sauerstoff der Atmosphäre funktionelle Gruppen (Karboxyl-, Hydroxyl-, Phenol-, Karbonyl-Gruppen) gebildet bzw. modifiziert, welche der Biokohle-Oberfläche eine negative Ladung und eine hohe Kationenaustauschkapazität (KAK) verleihen. Bei niedrigeren Temperaturen produzierte Biokohle weist schon zu Beginn eine höhere KAK und dadurch eine höhere Schwermetallimmobilisierung auf [6]. Die Sorption der Metalle geht mit einer Freisetzung von H^+-Ionen einher [7].

Physikalische Sorption: Eine Immobilisierung kann auch durch elektrostatische Wechselwirkungen zwischen positiv geladenen metallischen Kationen und den Pi-Elektronen der Liganden an den aromatischen Strukturen der Biokohle auftreten [8]. Da bei zunehmender Pyrolyse-Temperatur die aromatische Kondensation der Biokohle steigt während die oxygenierten funktionellen Gruppen weniger werden [9], nimmt der Anteil der durch elektrostatische Bindungen sorbierten Kationen zu. Biokohle, die bei niedrigeren Temperaturen unvollständiger pyrolysiert worden ist, behält mehr funktionelle Gruppen, die aber im Lauf der Zeit im Boden wieder ab- oder umgebaut werden können. Daher, können auf diese Weise sorbierte Metalle auch wieder freigesetzt werden [10]. Jedoch werden über den Verlauf von Monaten weiterhin negativ geladene funktionelle Gruppen geschaffen, welche den eventuellen Verlust von KAK durch Mineralisierung von residualer organischer Masse nach der Pyrolyse mehr als ausgleichen.

Ausfällung: Die Ausgangsmaterialien von Biokohle enthalten nie ausschließlich organische Masse, sondern auch einen unterschiedlich hohen Anteil von mineralischen Stoffen, welche in der Aschefraktion der Biokohle erhalten bleiben. Durch den hohen pH von Biokohle können Metalle wie Cu, Cd, Pb oder Zn als Phosphate oder Karbonate an der Oberfläche der Biokohle ausgefällt werden [3].

INDIREKTE WECHSELWIRKUNGEN

Indirekte Mechanismen beruhen auf der Wirkung von Biokohle auf die Bodeneigenschaften und beeinflussen in der Folge die Freisetzung oder Bindung von Schwermetallen oder Metalloiden.

Änderungen des pH: Das Einmischen von Biokohle in den Boden hat häufig pH-Änderungen zur Folge. Nicht modifizierte, pflanzenbasierte Biokohle weist oft pH-Werte von 8-9,5 auf und reduziert die Löslichkeit von Metallen durch die Bildung von Metallhydroxiden (z.B. ZnOH – [11]). Anders ist die Situation bei Metalloiden wie z.B. As, deren Löslichkeit und Verfügbarkeit häufig mit dem pH steigt [12]. Auch Sb und Mo weisen anionische Spezies im Boden auf und verhalten sich ähnlich wie As. Kationische Metalle, welche an negativ geladene Oberflächen im Boden gebunden sind, erhöhen hingegen bei niedrigem pH ihre Löslichkeit, da KAK und pH miteinander in positiver Beziehung stehen.

Organische Masse im Boden und löslicher Kohlenstoff (DOC): Biokohle im Boden trägt (zumindest kurzfristig) zur Erhöhung des DOC bei. Einige Metalle bzw. Metalloide wie z.B. Cu und As bilden bevorzugt Komplexe mit organischem Material und können dadurch vermehrt mobilisiert werden [13].

Phosphor-Verfügbarkeit: Biokohlen können als Quelle für Phosphor fungieren, welches je nach Ausgangsmaterial und Pyrolysebedingungen auch pflanzenverfügbar wird [14]. Erhöhte P-Versorgung der Pflanzen kann die Aufnahme von As in die Pflanzen reduzieren, da beide Elemente

das gleiche Aufnahmesystem in den Wurzeln verwenden [12, 15]. Durch Ausfällung von Pb-Phosphat kann die Konzentration von Pb in bergbau-belasteten Porenwässern reduziert werden [16].

Redox-Bedingungen: Die oxygenierten funktionellen Gruppen an der Biokohle-Oberfläche können den Oxidationszustand redoxempfindlicher Metalle und damit ihre Speziierung verändern. So kann das ökotoxikologisch gefährlichere Cr(VI) durch Sorption an Biokohle-Oberflächen in das harmlosere Cr(III) umgewandelt werden [17].

SCHWERMETALLE IN BIOKOHLE

Wird schwermetallbelastetes Ausgangsmaterial zur Herstellung von Biokohle verwendet, reichern sich diese Schwermetalle tendenziell an. Umso wichtiger ist es daher, unbelastete Biomasse bei der Pyrolyse einzusetzen. Derzeitige Regelungswerke beruhen auf freiwilliger Verpflichtung (z.B. das European Biokohle Certificate, das britische Biokohle Quality Mandate oder der ÖNORM-Vorschlag S 2211-1) und sind auf die Schadstoffgehalte des Karbonisates fokussiert. Es obliegt daher dem Pyrolyse-Betreiber, durch Auswahl der entsprechenden Materialien aus einer Positivliste und Wahl der optimalsten Prozessparameter die Gehalte an Schadstoffen so weit zu erniedrigen, dass die Biokohle in eine der beiden Qualitätsklassen (welche in allen drei Regelungswerken vorgesehen sind) fällt.

BIOKOHLE IN DER BODENSANIERUNG

Böden auf Altstandorten früherer industrieller Tätigkeiten können Schwermetallgehalte aufweisen, welche das Bodenleben beeinträchtigen, durch Abschwemmungen oder Versickerung eine Gefahr für Oberflächenwasser und Grundwasser darstellen und durch Phytotoxizität den Wiederbewuchs verhindern. Die Sorptionseigenschaften von Biokohle sind prinzipiell geeignet, die Bioverfügbarkeit vieler Schadelemente zu reduzieren und dadurch die Ökotoxizität zu verringern [18]. Häufig werden zusätzlich Nährstoffe in Ergänzung zu Biokohle als Bodenhilfsstoff erforderlich sein, um eine Begrünung zu erzielen oder die Produktivität von schadstoffbelasteten Grenzertragsflächen zu erhöhen. Wie bei allen Bodensanierungsverfahren ist es auch beim Einsatz von Biokohle unerlässlich, die standortspezifischen Besonderheiten des Bodens und der Schadstoffcharakteristik zu berücksichtigen und in Vorversuchen die Effektivität des geplanten Verfahrens zu prüfen. Unterschiedliche Schadstoffcocktails können nur mit fallspezifisch optimierten Biokohlen behandelt werden. Insbesondere ist auf die Gegenwart von As oder anderen anionischen Schadelementen zu achten, um die Gefahr der unerwünschten Mobilisierung zu vermeiden.

LITERATUR

[1] Semple,K. T., K. J. Doick, K. C. Jones, P. Burauel, A. Craven & H. Harms: Defining bioavailability and bioaccessibility of contaminated soil and sediment is complicated, *Environmental Science & Technology.* **38,** 228A-231A, 2004

[2] Park, J. H., G. K. Choppala, N. S. Bolan, J. W. Chung & T. Chuasavathi: Biochar reduces the bioavailability and phytotoxicity of heavy metals, *Plant and Soil.* **348,** 439-451, 2011

[3] Beesley, L., E. Moreno-Jimenez, G. Fellet, L. Leonidas Melo & T. Tom Sizmur: Biochar and heavy metals. In: Lehmann,L. and Joseph,S.: *Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation*. 2nd ed., Routledge, pp. 563-594, 2015

[4] Chen, B. L., Z. M. Chen & S. F. Lv: A novel magnetic biochar efficiently sorbs organic pollutants and phosphate, *Bioresource Technology.* **102,** 716-723, 2011

[5] Frišták, V., W. Friesl-Hanl, M. Pipíška, B. Richveisová-Micháleková & G. Soja: The response of artificial aging to sorption properties of biochar for potentially toxic heavy metals, Nova Biotechnologica et Chimica 13, 137-147, 2014

[6] Beesley, L. & M. Marmiroli: The immobilisation and retention of soluble arsenic, cadmium and zinc by biochar, *Environmental Pollution.* **159,** 474-480, 2011

[7] Uchimiya, M., I. M. Lima, K. T. Klasson, S. C. Chang, L. H. Wartelle & J. E. Rodgers: Immobilization of Heavy Metal Ions (Cu(II), Cd(II), Ni(II), and Pb(II)) by Broiler Litter-Derived biochars in Water and Soil, *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* **58,** 5538-5544 2010

[8] Gomez-Eyles, J. L., L. Beesley, E. Moreno-Jimenez, U. Ghosh & T. Sizmur: The potential of biochar amendments to remediate contaminated soils, in: Ladygina, N., Rineau, F. (eds.), Biochar and Soil Biota. CRC Press, Boca Raton, London, New York, pp. 100-133, 2013

[9] McBeath, A. V., C. M. Wurster & M. I. Bird: Influence of feedstock properties and pyrolysis conditions on biochar carbon stability as determined by hydrogen pyrolysis, *Biomass & Bioenergy.* **73,** 155-173, 2015

[10] Mukherjee, A., A. R. Zimmerman & W. Harris: Surface chemistry variations among a series of laboratory-produced biochars, *Geoderma.* **163,** 247-255, 2011

[11] Brümmer,G. W., J. Gerth & U. Herms: Heavy metal species, mobility and availability in soils, *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 149, 382-398, 1986

[12] Moreno-Jimenez, E, E. Esteban, & R. O. Carpena-Ruiz, M. C. Lobo & J. M. Penalosa: Phytostabilisation with Mediterranean shrubs and liming improved soil quality in a pot experiment with a pyrite mine soil. JOURNAL OF HAZARDOUS MATERIALS 201, 52-59, 2012

[13] Kloss, S., F. Zehetner, J. Buecker, E. Oburger, W. W. Wenzel, A. Enders, J. Lehmann & G. Soja: Trace element biogeochemistry in the soil-water-plant system of a temperate agricultural soil amended with different biochars, *Environmental Science and Pollution Research.* **22,** 4513-4526, 2015.

[14] Kloss, S., F. Zehetner, B. Wimmer, J. Buecker, F. Rempt & G. Soja: Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* **177,** 3-15, 2014

[15] Beesley, L., M. Marmiroli, L. Pagano, V. Pigoni, G. Fellet, T. Fresno, T. Vamerali, M. Bandiera & N. Marmiroli: Biochar addition to an arsenic contaminated soil increases arsenic concentrations in the pore water but reduces uptake to tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.), *Science of the Total Environment.* **454,** 598-603, 2013

[16] Karami, N., R. Clemente, E. Moreno-Jimenez, N. W. Lepp & L. Beesley: Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass, *Journal of Hazardous Materials.* **191,** 41-48, 2011

[17]: Choppala, G. K., N. S. Bolan, M. Megharaj, Z. Chen & R. Naidu: The influence of biochar and black carbon on reduction and bioavailability of chromate in soils, *Journal of Environmental Quality.* **41,** 1175-1184, 2012

[18] Karer, J., A. Wawra, F. Zehetner, G. Dunst, M. Wagner, P. B. Pavel, M. Puschenreiter, W. Friesl-Hanl & G. Soja: Effects of biochars and Compost Mixtures and Inorganic Additives on Immobilisation of Heavy Metals in Contaminated Soils, *Water Air and Soil Pollution.* **226,** 342, 2015

12.2.4 WECHSELWIRKUNGEN VON BIOKOHLE MIT PFLANZENNÄHRSTOFFEN

(Gerhard Soja)[30]

Die molekulare Struktur der Biokohle-Oberflächen sorgt nicht nur für hohe chemische und mikrobielle Stabilität, sondern beeinflusst auch das Bindungsvermögen für Kationen und Anionen, die in der Pflanzenernährung wichtig sind. Dieser Aspekt ist einer der Hauptauslöser für das im vergangenen Jahrzehnt entstandene Interesse an Biokohle. Die durch Biokohle verbesserte Fertilität verwitterter tropischer Böden hat eine Welle von Forschungsarbeiten über die Wirkungsmechanismen und zur Übertragbarkeit dieser Ergebnisse auf die Böden gemäßigter klimatischer Zonen ausgelöst [1].

Biokohle kann einerseits selbst eine Quelle für Nährstoffe darstellen, andererseits die Bodeneigenschaften so beeinflussen, dass die Verfügbarkeit vorhandener Nährstoffe beeinflusst wird. Während Menge und Verfügbarkeit von Nährstoffen in Biokohle vom Inputmaterial und den Pyrolysebedingungen abhängen, kann die Verfügbarkeit der Nährstoffe durch die physikalisch-chemischen Änderungen der Bodeneigenschaften sowohl positiv als auch negativ beeinflusst werden. Die Verflüchtigung von N beginnt bereits bei Pyrolyse-Temperaturen ab 200° C, von S bei 375° C und von P sowie K bei 700° C [2, 3]. Mg, Ca und Mn werden erst über 1000° C flüchtig [4]. Aus diesem Grund verschieben sich die Verhältnisse der Element-Konzentrationen deutlich, sodass während der Pyrolyse N und S teilweise verloren gehen. Obwohl N in Biokohle aus Holz oder aus anderen pflanzlichen Reststoffen noch in Gesamtkonzentrationen von 0.3 – 1.2 % vorliegen kann [5], ist dieser Stickstoff häufig in heterozyklischen Verbindungen eingebaut und nicht leicht verfügbar [6, 7]. Soll Biokohle als Vektor für N eingesetzt werden, ist es erforderlich, die Biokohle-Oberfläche mit leichter verfügbaren N-Formen nach der Pyrolyse zu modifizieren. Dies kann durch Mischung unterschiedlich N-reicher Ausgangsmaterialien [8] oder durch Postmodifikation von pflanzenbasierter Biokohle mit Ammoniak [9] oder Urin [10] erfolgen. Auch die Mit-Kompostierung von Biokohle erfüllt neben der Verringerung der N-Verluste den Zweck der Nährstoff-Anreicherung der Biokohle [11, 12]. Am einfachsten wird das Defizit von Biokohle an leicht verfügbarem N durch parallele Applikationen von mineralischem N oder Kompost ausgeglichen [13].

Die Aufnahme von P durch Pflanzen erfolgt in Form von HPO_4^{2-} oder $H_2PO_4^-$, aber kaum in organischer Form. Die Nachlieferungsrate des im Boden meist an Mineralphasen oder als Ca-Phosphat fest gebundenen P ist neben der N-Verfügbarkeit ebenfalls oft ein limitierender Wachstumsfaktor für Pflanzen. In Biokohle aus Pflanzenmaterial kommen etwa 0.1 bis 0.4 % P vor, während bei der Verwendung von P-reichem Inputmaterial wie Wirtschaftsdünger, Klärschlamm oder tierischen Abfällen bis zu 5 % P anzutreffen sind [14, 15]. Je nach Ausgangsmaterial der

[30] Energy Department, Environmental Resources and Technologies, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Konrad Lorenz-Str. 24, 3430 Tulln; E-Mail: gerhard.soja@ait.ac.at

Biokohle kommt P in verschiedenen chemischen Formen vor, welche die Bioverfügbarkeit im Boden bestimmen. Biokohle beinhaltet drei Hauptpools von P, von denen einer den leicht löslichen Anteil darstellt, ein anderer fest an Fe und Al gebunden ist und der dritte organisch gebunden als Rest der ursprünglichen Biomasse enthalten ist [2]. Von diesen Pools ist der leicht lösliche von besonderer Bedeutung und kann signifikant zur Pflanzenernährung beitragen, auch wenn nur pflanzliches Ausgangsmaterial bei der Pyrolyse verwendet worden ist [16, 17]. Erhöhungen der Phosphatase-Aktivität im Boden können durch Biokohle induziert werden [18], hängen aber auch mit den standortspezifischen Biokohle-Boden-Wechselwirkungen und den Auswirkungen auf die Boden-Mikrobiologie zusammen. Dadurch dass Biokohle ein für das Pilzwachstum günstigeres Milieu im Boden schafft, wird die Mykorrhiza-Kolonisierung der Wurzeln unterstützt und fördert auch die Stress-Resistenz der Pflanzen [19-21]. Beim Versuch einer P-Anreicherung von Biokohle nach der Pyrolyse oder bei Verwendung von Biokohle als Sorbens für P muss immer der anionische Charakter der Phosphate beachtet werden, welcher für eine starke Sorption an Biokohle-Oberflächen nicht förderlich ist und nur über zusätzliche Liganden zu erreichen ist.

Wenn Biokohle-Applikationen in landwirtschaftlichen Böden zu einer pH-Anhebung führen, ist zu beachten, dass diese in Mangelsituationen für die Pflanzenernährung mit Spurenelementen auch ungünstig sein kann. Während einige Spurenelemente bei höherem pH schlechter verfügbar sind, werden andere (z.B. Mo, As) mobilisiert und vermehrt von Pflanzen aufgenommen oder in tiefere Bodenschichten verlagert [22, 23].

LITERATUR

[1] Atkinson, C. J., J. D. Fitzgerald & N. A. Hipp: Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review, *Plant and Soil.* **337,** 1-18, 2010

[2] DeLuca, T. H., M. J. Gundale, M. D. MacKenzie & D. L. Jones: Biochar effects on soil nutrient transformations, pp. 421-454. In: In: Biochar for Environmental Management. Lehmann, J.: Joseph, S. (eds.), Earthscan / Routledge, London, New York, 2015

[3] Raclavska, H., A. Corsaro, D. Juchelkova, V. Sassmanova & J. Frantik: Effect of temperature on the enrichment and volatility of 18 elements during pyrolysis of biomass, coal, and tires, *Fuel Processing Technology.* **131,** 330-337, 2015.

[4] Neary, D. G., C. C. Klopatek, L. F. Debano & P. F. Ffolliott: Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis, *Forest Ecology and Management.* **122,** 51-71, 1999

[5] Kloss, S, F. Zehetner, A. Dellantonio, R. Hamid, F. Ottner, V. Liedtke, M. Schwanninger, M. H. Gerzabek & G. Soja: Characterization of slow pyrolysis biochars: effects of feedstocks and pyrolysis temperature on biochar properties. Journal of Environmental Quality 41, 990-1000, 2012

[6] Chen, C. P., C. H. Cheng, Y. H. Huang, C. T. Chen, C. M. Lai, O. V. Menyailo, L. J. Fan & Y. W. Yang: Converting leguminous green manure into biochar: changes in chemical composition and C and N mineralization, *Geoderma.* **232,** 581-588, 2014

[7] Zhang, M., L. Shu, X. Shen, X. Guo, S. Tao, B. Xing & X. Wang: Characterization of nitrogen-rich biomaterial-derived biochars and their sorption for aromatic compounds, *Environmental Pollution.* **195,** 84-90, 2014

[8] Lin, Y., P. Munroe, S. Joseph, A. Ziolkowski, L. van Zwieten, S. Kimber & J. Rust: Chemical and structural analysis of enhanced biochars: Thermally treated mixtures of Biochar, chicken litter, clay and minerals, *Chemosphere.* **91,** 35-40, 2013

[9] Zhang, X., S. H. Zhang, H. P. Yang, Y. Feng, Y. Q. Chen, X. H. Wang & H. P. Chen: Nitrogen enriched biochar modified by high temperature CO2-ammonia treatment: Characterization and adsorption of CO2, *Chemical Engineering Journal.* **257,** 20-27, 2014

[10] Zhang, Y., Z. F. Li I. B. Mahmood: Effects of Corn Cob Produced biochars on Urea Recovery from Human Urine and Their Application as Soil Conditioners, *Clean-Soil Air Water.* **43,** 1167-1173, 2015

[11] Schulz, H., G. Dunst & B. Glaser: Positive effects of composted biochar on plant growth and soil fertility, *Agronomy for Sustainable Development.* **33,** 817-827, 2013

[12] Kammann, C. I., H. P. Schmidt, N. Messerschmidt, S. Linsel, D. Steffens, C. Muller, H. W. Koyro, P. Conte & S. Joseph: Plant growth improvement mediated by nitrate capture in co-composted biochar, *Scientific Reports.* **5,** 11080, 2015

[13] Liu, J., H. Schulz, S. Brandl, H. Miehtke, B. Huwe & B. Glaser: Short-term effect of biochar and compost on soil fertility and water status of a Dystric Cambisol in NE Germany under field conditions, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* **175,** 698-707, 2012

[14] Warren, G. P., J. S. Robinson & E. Someus: Dissolution of phosphorus from animal bone char in 12 soils, *Nutrient Cycling in Agroecosystems.* **84,** 167-178 2009

[15] Edelstein, D. M. & D. J. Tonjes: Modeling an Improvement in Phosphorus Utilization in Tropical Agriculture, *Journal of Sustainable Agriculture.* **36,** 18-35, 2012

[16] Quilliam, R. S., K. A. Marsden, C. Gertler, J. Rousk, T. H. Deluca & D. L. Jones: Nutrient dynamics, microbial growth and weed emergence in biochar amended soil are influenced by time since application and reapplication rate, *Agriculture Ecosystems & Environment.* **158,** 192-199, 2012

[17] Kloss, S., F. Zehetner, B. Wimmer, J. Buecker, F. Rempt & G. Soja: Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science.* **177,** 3-15, 2014

[18] Du, Z. L., Y. D. Wang, J. Huang, N. Lu, X. R. Liu, Y. L. Lou & Q. Z. Zhang: Consecutive biochar Application Alters Soil Enzyme Activities in the Winter Wheat-Growing Season, *Soil Science.* **179,** 75-83, 2014

[19] Solaiman, Z. M., P. Blackwell, L. K. Abbott & P. Storer: Direct and residual effect of biochar application on mycorrhizal root colonisation, growth and nutrition of wheat, *Australian Journal of Soil Research.* **48,** 546-554 2010

[20] Vanek, S. J. & J. Lehmann: Phosphorus availability to beans via interactions between mycorrhizas and biochar, *Plant and Soil.* **395,** 105-123, 2015

[21] Hammer, E. C., M. Forstreuter, M. C. Rillig & J. Kohler: Biochar increases arbuscular mycorrhizal plant growth enhancement and ameliorates salinity stress, *Applied Soil Ecology.* **96,** 114-121, 2015

[22] Kloss, S., F. Zehetner, E. Oburger, J. Buecker, B. Kitzler, W. W. Wenzel, B. Wimmer & G. Soja: Trace element concentrations in leachates and mustard plant tissue (Sinapis alba L.) after biochar application to temperate soils, *Science of the Total Environment.* **481,** 498-508., 2014

[23] Kloss, S., F. Zehetner, J. Buecker, E. Oburger, W. W. Wenzel, A. Enders, J. Lehmann & G. Soja: Trace element biogeochemistry in the soil-water-plant system of a temperate agricultural soil amended with different biochars, *Environmental Science and Pollution Research.* **22,** 4513-4526, 2015

12.2.5 AUSWIRKUNGEN VON BIOKOHLE AUF STICKSTOFFMINERALISATION, IMMOBILISATION UND NITRIFIKATION

(Katharina Keiblinger, Franz Zehetner)[31]

Mineralisierung und Immobilisierungsraten im Boden sind eine Funktion der mikrobiell verfügbaren C- und N-Pools. In der Regel steigt mit höherem C:N-Verhältnis die N Immobilisierung. Die Biokohle-Applikation in den Boden bringt eine neue Dimension für die C- und N-Pools. Die Zugabe von Biokohle aus unterschiedlichen Input-Materialien und Prozessen hat gezeigt:

- es kann zu einer langsameren Mineralisierung der Biokohle Materialien im Vergleich zur nicht pyrolysierten Biomasse kommen [1],
- verringerte Netto N-Mineralisierung tritt auf [2, 3],
- erhöhte netto N-Mineralisierung wird erzielt [2], oder
- es bestehen keine Auswirkungen auf die Mineralisierung [4, 5], und wenig Einfluss auf DON [6].

Darüber hinaus wurde gezeigt dass Biokohle entweder keine Auswirkungen auf die Boden-N Immobilisierung hat [7] oder Immobilisierung fördert [8]. Bisher wurde angenommen, dass der N-Anteil in Biokohle mit Pflanzen als Ausgangsmaterial eine geringe Verfügbarkeit aufweist. Die Verschiedenheit dieser Ergebnisse ist zumindest teilweise durch die Verwendung unterschiedlicher Biokohlen mit variablen Anteilen von niedermolekularen, leicht bioverfügbaren Verbindungen an der Biokohlen-Oberfläche bedingt.

Biokohle-Anwendung hat möglicherweise keine Auswirkungen auf Brutto- oder Netto Nitrifikationsraten in landwirtschaftlichen Böden [2, 7], aber sie hat gezeigt, dass die Netto Nitrifikation in natürlichen Ökosystemen gefördert wird durch den Biokohle induzierten pH Anstieg oder die Reduktion von hemmenden Substanzen wie Polyphenole oder Tannine [2, 9, 10].

Haben Agrarökosysteme bereits hohe Nitrifikationsraten, so erzeugt eine Applikation von Biokohle kaum positive Effekte auf die Netto Nitrifikationsraten [9]. Eine Studie zu Biokohle-Stimulation der Brutto-Nitrifikation in einem landwirtschaftlichen Boden zeigte erhöhte Mineralisierung von NH_4 aus dem rekalzitranten (schwer abbaubaren) Stickstoffpool im Boden während der Fluss größer war als die Aufnahme von NH_4 in den labilen Boden Stickstoffpool [11].

[31] Institut für Bodenforschung, Peter Jordan Straße 82, 1190 Wien; E-Mail: katharina.keiblinger@boku.ac.at; franz.zehetner@boku.ac.at

Die Biokohle Applikation in einem österreichischen Ackerland bewirkte eine Reduktion von 50 bis 80% der Bruttoraten von organischen N-Transformationsprozessen [12]. Diese Ergebnisse legen nahe, dass der Zusatz von anorganischen Dünger-N in Kombination mit Biokohle die Verringerung der organischen N-Mineralisierung kompensieren könnte, da Pflanzen und Mikroben den anorganischen Dünger-N für ihr Wachstum einsetzen und wiederum den unterirdischen Aufbau von organischen N antreiben [12]. Die kombinierte Zugabe von Biokohle mit N-Dünger kann im organischen Boden N verbessern sowie den Anteil an Bodenkohlenstoffbindung erhöhen und dadurch eine grundlegende Rolle bei zukünftigen Bodenmanagementstrategien spielen [12].

Die Zugabe von Biokohle zu Waldböden erhöhte die Nitrifikationsraten im Boden und änderte die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft [9, 10]. Jedoch scheint es keine Studien zu geben, die diese Wirkung für intensiv bewirtschaftete Böden belegen. Gründe dafür könnten sein, dass diese Böden bereits aktiv nitrifizierende Gemeinschaften enthalten, ein Mangel an Forschung in diesem Bereich besteht oder natürlich vorkommende Nitrifikationsinhibitoren (Typ oder Mengen) in intensiv bewirtschafteten Böden fehlen. Die verbesserten Nitrifikationsraten in Wald Ökosystemen sind vermutlich das Ergebnis der Adsorption von löslichen Phenolen und Terpenen; Verbindungen, die wie wir wissen, die Nitrifikation hemmen können. Es hat sich gezeigt, dass die Bioverfügbarkeit und die Reaktivität (extrazellulärer) Proteine, die auch für Prozesse wie die Nitrifikation verantwortlich sind, durch die Bindung an Oberflächen reduziert werden können [13]. Allerdings ist über die Wirkung von Biokohle auf die Sorption von organischem N ist wenig bekannt. Bei der Sorption von Proteinen im Boden bzw. Boden-Biokohle-Mischungen spielen verschiedene Eigenschaften eine wichtige Rolle, wie z.B. der pH-Wert, die Hydrophobizität bzw. die Kationenaustauschkapazität. Proteine binden reversibel durch ein Kationenaustauschverfahren, das auf der Aminosäure-Zusammensetzung des Proteins beruht. Außerdem kann die Sorption von Proteinen durch deren Polarität in Form von hydrophoben Wechselwirkungen beeinflusst sein [14]. Eine Studie hat gezeigt, dass möglicherweise die Hydrophobizität der Biokohle eine Rolle bei der verringerten Protein Sorption im Boden spielt [15]. Diese Ergebnisse und die mehr als doppelt so hohen Brutto-Nitrifikationsraten in einem landwirtschaftlich genutzten Boden [12] untermauern die mögliche Bindung von Inhibitoren an die Biokohle.

MINERALISCHER N (NH_4, NO_3 UND NH_3) UND ORGANISCHER N (PROTEIN, PEPTIDE, AMINOSÄUREN, DON)

Die NO_3-Adsorption von Biokohle liegt im Bereich von 0,6 mg g^{-1} Biokohle, tritt bei Pyrolysetemperaturen > 600° C auf und ist stark vom Ausgangsmaterial und der NO_3^- Konzentration abhängig. Allerdings kann die Biokohle-Applikation in einem sauren Boden verminderte NO_3-Sorption zur Folge haben aufgrund reduzierter Anionenaustauschkapazität [11]. Hingegen hängt die NH_4^+ Adsorptionsfähigkeit der Biokohle vom Ausgangsmaterial ab, allerdings ist kein Trend hinsichtlich der Pyrolysetemperatur erkennbar [16]. Für die NH_3 Adsorption wurden jedoch die niedrigeren Pyrolysetemperaturen von 500° C als vorteilhaft erkannt im Gegensatz zu Temperaturen von 700° C und darüber [17]. Wie die Elektronenspinresonanz-Spektroskopie belegt, ist dies darauf zurückzuführen, dass die sauren funktionellen Gruppen mit steigender Temperatur abnehmen. Die Fähigkeit der Biokohle, NH_3 zu adsorbieren, dürfte stark von der Säurefunktionen abhängen bzw. erhöhen andere Biokohle-Behandlungen, wie z.B. Ozon, die NH_3-Adsorption [18, 19]. Die Reduktion der NH_3-Verluste variiert mit N-Quelle und Biokohle Eigenschaften. Als ein Ergebnis der NH_3-Adsorption werden Amide und Amine auf der schwarzen Kohlenstoffoberfläche gebildet [20]. Die Fähigkeit der Biokohle zur NH_3 Sorption wurde durch Doydora et al. anhand von Pinienchips- und Erdnussschalen-Biokohlen überprüft, die bei 400° C pyrolysiert und mit HCl angesäuert wurden [21]. Die angesäuerten Biokohlen wurden in den Boden entweder oberflächlich aufgebracht oder mit Geflügeldung eingearbeitet. Die NH_3 Emissionen durch Hühnermist verringerte sich um 58 % bis 63 % und 56 % bis 60 % für die oberflächlich aufgebrachte bzw. eingearbeitete Biokohle.

Allerdings kann bei Anwendung von angesäuerter Biokohle, die Menge der anorganischen N-Verluste über das Sickerwasser aufgrund der Anreicherung von nicht-flüchtigem N im Boden erhöht sein. Dies ist jedoch sehr stark von der darauf wachsenden Vegetation abhängig und ob diese entsprechend N aufnimmt oder ob der Boden brach liegt. Das Potential von Biokohle als N-Dünger, indem sich der N-Gehalt über NH_3 Adsorption erhöht, haben Taghizadeh-Toosi et al. einer Studie erhoben [22]: Die N angereicherte Biokohle führte zu einer Steigerung der pflanzlichen Biomasse bis zum dreifachen Wert.

Auch die Bodenfeuchte beeinflusst die NH_3-Aufnahme der Biokohle. Allerdings sind hierzu Ergebnisse aus Langzeitfeldversuchen notwendig, um unser Verständnis von Biokohle als Langzeit N-Dünger und dessen Auswirkungen zu verbessern.

Neben der Freisetzung von Stickstoff, der intrinsisch in Biokohle gebunden ist [23-25], gab es Versuche zur weiteren Verbesserung der N-Abgabe von Biokohle, indem man Nährstoffe zur Biokohle zugesetzt hat bevor diese in den Boden eingearbeitet wurde. Zum Beispiel wurden die N-Gehalte der Biokohle durch Vermischung von Biokohle mit flüssiger Gülle um 8,3 % erhöht [26]. Der Vergleich von herkömmlicher Biokohle mit der N angereicherten Biokohle verringerte die Netto-Nitrifikation und die Netto-Ammonifikationsraten durch die N angereicherte Biokohle etwas stärker, jedoch lassen die Ergebnisse von Sarkhot et al. [26] schlussfolgern, dass N angereicherte Biokohle als Langzeitdünger eingesetzt werden könnte.

Auch die Adsorption von Ammoniak (NH_3) an Biokohle verringert NH_3 und NO_3- Verluste während der Kompostierung und nach Gülle-Anwendungen. Damit bietet sie einen Mechanismus für die Entwicklung von Langzeitdünger. Der Einsatz von Biokohle mit hohem N-Gehalt, hergestellt aus Gülle, kann die erhöhte N-Verfügbarkeit der Pflanzen erklären. Gülle basierte Biokohlen eignen sich als N-Dünger. Gülle und Klärschlamm-Biokohlen, die bei niedriger Temperatur pyrolisiert wurden, weisen hohe Anteile an hydrolysierbaren organischen N-Formen auf, wie z.B. Aminosäuren [25]. Die hydrolysierbaren organischen N-Fraktionen in den Biokohlen verringern sich mit steigenden Pyrolysetemperaturen, allerdings mit zunehmenden aromatischen und heterocyclische Strukturen [27] und der Reduktion von labilen N-Formen (beispielsweise Proteinen). Die Tatsache, dass Pflanzen in der Lage sind organische N-Verbindungen zu assimilieren [28], und dass die Mineralisierung von organischem N auch anorganisches N liefert, ist eine mögliche Erklärung von erhöhten Erträgen bei der Anwendung von Gülle basierten Biokohlen [28].

Unter Zusatz von Biokohle kommt es zu einer vermehrten Expression einiger Gene, die für den Blattproteinumsatz verantwortlich sind, wodurch sich der Proteinkatabolismus (proteolytische Aktivität) sowie der Anabolismus erhöhen. Untersucht werden sollen die verfügbaren organischen N-Gehalte in den verwendeten Biokohlen und ob die bioverfügbaren organischen N-Anteile zur verstärkten proteolytischen Aktivität beitragen [25, 29].

Die Menge an Schlüsselmineralstoffen in der Biokohle kann in direktem Zusammenhang mit dem Anteil dieser Nährstoffe des Ausgangsmaterials vor der Pyrolyse stehen. Die Einbringung von Biokohle in den Boden beeinflusst die Bodenstruktur, Textur, Porosität, Korngrößenverteilung und Dichte. Die molekulare Struktur der Biokohlen zeigt einen hohen Grad an chemischer und mikrobieller Stabilität. Ein wichtiger physikalischer Parameter der meisten Biokohlen ist ihre hochporöse Struktur und ihre hohe spezifische Oberfläche. Diese Struktur kann als Habitat für nützliche Bodenmikroorganismen wie Mykorrhizapilze und Bakterien dienen und beeinflusst die Bindung von wichtigen Nährstoff-Kationen und Anionen. Diese Bindung kann ihrerseits die Verfügbarkeit von Makronährstoffen, wie N und P, verbessern (siehe Kapitel Biokohle als Sorbens für Nährstoffe). Weiters kann Biokohle den Boden durch dessen Alkalisierung verbessern, seine

elektrische Leitfähigkeit (EC) erhöhen und die Kapazität für den Kationenaustausch (CEC) vergrößern [30].

AUSWIRKUNG DER BIOKOHLE AUF MIKROORGANISMEN

Biokohle-Aufbringung reduziert Organismen, die an der Nitrifikation von Ammonium (NH_4^+) zu Nitrit (NO_2^-) beteiligt sind, während die mykobakterielle Nitratreduktion zu NH_4^+ mit der N_2-Fixierung ansteigt. Gemeinsam mit der NH_4-Sorption der Biokohle erklären diese Effekte die geringeren N_2O Emissionen [31]. Biokohle fördert auch die Abundanz (Vorkommens-Häufigkeit) von Phosphat lösenden Bakterien, verringert möglicherweise bakterielle Pflanzenpathogene und ändert C-Flüsse durch das verstärkte Auftreten von Bakterien, die in der Lage sind rekalzitrante C-Verbindungen abzubauen[31].

LITERATUR

[1] Knoblauch, C., A.-A. Maarifat, E.-M. Pfeiffer & S. M. Haefele: Degradability of black carbon and its impact on trace gas fluxes and carbon turnover in paddy soils. Soil Biology and Biochemistry 43, 1768-1778 2011

[2] Castaldi, S., M. Riondino, S. Baronti, F. Esposito, R. Marzaioli, F. Rutigliano, F. Vaccari & F. Miglietta: Impact of biochar application to a Mediterranean wheat crop on soil microbial activity and greenhouse gas fluxes. Chemosphere 85, 1464-1471, 2011

[3] Dempster, D., D. Gleeson, Z. Solaiman, D. Jones & D. Murphy: Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. Plant and soil 354, 311-324, 2012

[4] Streubel, J., H. Collins, M. Garcia-Perez, J. Tarara, D. Granatstein & C. Kruger: Influence of contrasting biochar types on five soils at increasing rates of application. Soil Science Society of America Journal 75, 1402-1413, 2011

[5] Schomberg, H. H., J. W. Gaskin, K. Harris, K. Das, J. M. Novak, W. J. Busscher, D. W. Watts, R. H. Woodroof, I. M. Lima & M. Ahmedna: Influence of biochar on nitrogen fractions in a coastal plain soil. Journal of Environmental Quality 41, 1087-1095, 2012

[6] Dempster, D. N., D. L. Jones & D. V. Murphy: Clay and biochar amendments decreased inorganic but not dissolved organic nitrogen leaching in soil. Soil Research 50, 216-221, 2012

[7] Cheng, Y., Z.-C. Cai, S. Chang, J. Wang & J.-B. Zhang: Wheat straw and its biochar have contrasting effects on inorganic N retention and N2O production in a cultivated Black Chernozem. Biology and fertility of Soils 48, 941-946 2012

[8] Bruun, E. W., P. Ambus, H. Egsgaard & H. Hauggaard-Nielsen: Effects of slow and fast pyrolysis biochar on soil C and N turnover dynamics. Soil Biology and Biochemistry 46, 73-79, 2012

[9] DeLuca, T., M. MacKenzie, M. Gundale & W. Holben: Wildfire-produced charcoal directly influences nitrogen cycling in ponderosa pine forests. Soil Science Society of America Journal 70, 448-453, 2006

[10] Ball, P., M. MacKenzie, T. DeLuca & W. Montana: Wildfire and charcoal enhance nitrification and ammonium-oxidizing bacterial abundance in dry montane forest soils. Journal of Environmental Quality 39, 1243-1253, 2010

[11] Nelissen, V., T. Rutting, D. Huygens, J. Staelens, G. Ruysschaert & P. Boeckx: Maize biochars accelerate short-term soil nitrogen dynamics in a loamy sand soil. Soil Biol Biochem 55, 20-27, 2012

[12] Prommer, J., W. Wanek, F. Hofhansl, D. Trojan, P. Offre, T. Urich, C. Schleper, S. Sassmann, B. Kitzler & G. Soja: Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial. PloS one 9, 2014

[13] Bailey, V. L., S. J. Fansler, J. L. Smith & H. Bolton Jr: Reconciling apparent variability in effects of biochar amendment on soil enzyme activities by assay optimization. Soil Biology and Biochemistry 43, 296-301, 2011

[14] Norde, W.: My voyage of discovery to proteins in flatland …and beyond. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 61, 1-9, 2008

[15] Keiblinger, K. M., D. Liu, A. Mentler, F. Zehetner & S. Zechmeister-Boltenstern: Biochar application reduces protein sorption in soil. Organic Geochemistry 87, 21-24, 2015

[16] Clough, T. J., L. M. Condron, C. Kammann & C. Müller: A review of biochar and soil nitrogen dynamics. Agronomy 3, 275-293, 2013

[17] Asada, T., S. Ishihara, T. Yamane, A. Toba, A. Yamada & K. Oikawa: Science of bamboo charcoal: Study on carbonizing temperature of bamboo charcoal and removal capability of harmful gases. J Health Sci 48, 473-479, 2002

[18] Kastner, J. R., J. Miller, K. Das: Pyrolysis conditions and ozone oxidation effects on ammonia adsorption in biomass generated chars. Journal of hazardous materials 164, 1420-1427, 2009

[19] Spokas, K. A., J. M. Novak & R. T. Venterea: Biochar's role as an alternative N-fertilizer: ammonia capture. Plant and soil 350, 35-42, 2012

[20] Petit, C., K. Kante & T. J. Bandosz: The role of sulfur-containing groups in ammonia retention on activated carbons. Carbon 48, 654-667, 2010

[21] Doydora, S. A., M. L. Cabrera, K. C. Das, J. W. Gaskin, L. S. Sonon & W. P. Miller: Release of nitrogen and phosphorus from poultry litter amended with acidified biochar. International journal of environmental research and public health 8, 1491-1502, 2011

[22] Taghizadeh-Toosi, A., T. J. Clough, L. M. Condron, R. R. Sherlock, C. R. Anderson & R. A. Craigie: Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches. Journal of Environmental Quality 40, 468-476, 2011

[23] De la Rosa, J. M. & H. Knicker: Bioavailability of N released from N-rich pyrogenic organic matter: An incubation study. Soil Biology and Biochemistry 43, 2368-2373, 2011

[24] Schouten, S., J. W. van Groenigen, O. Oenema & M. L. Cayuela: Bioenergy from cattle manure? Implications of anaerobic digestion and subsequent pyrolysis for carbon and nitrogen dynamics in soil. GCB Bioenergy 4, 751-760, 2012

[25] Wang, T., M. C. Arbestain, M. Hedley, P. Bishop: Chemical and bioassay characterisation of nitrogen availability in biochar produced from dairy manure and biosolids. Organic Geochemistry 51, 45-54, 2012

[26] Sarkhot, D., T. Ghezzehei & A. Berhe: Effectiveness of Biochar for sorption of ammonium and phosphate from dairy effluent. Journal of Environmental Quality 42, 1545-1554, 2013

[27] Almendros, G., H. Knicker & F. J. González-Vila: Rearrangement of carbon and nitrogen forms in peat after progressive thermal oxidation as determined by solid-state 13C- and 15N-NMR spectroscopy. Organic Geochemistry 34, 1559-1568, 2003

[28] Schimel, J. P. & J. Bennett: Nitrogen mineralization: challenges of a changing paradigm. Ecology 85, 591-602, 2004

[29] Noguera, D., S. Barot, K.-. Laossi, J. Cardoso, P. Lavelle & M. C. de Carvalho: Biochar but not earthworms enhances rice growth through increased protein turnover. Soil Biology and Biochemistry 52, 13-20, 2012

[30] Atkinson, C. J., J. D. Fitzgerald & N. A. Hipps: Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. Plant and soil 337, 1-18, 2010

[31] Anderson, C. R., L. M. Condron, T. J. Clough, M. Fiers, A. Stewart, R. A. Hill & R. R. Sherlock: Biochar induced soil microbial community change: implications for biogeochemical cycling of carbon, nitrogen and phosphorus. Pedobiologia 54, 309-320, 2011

12.2.6 BIOKOHLEAPPLIKATION UND DESSEN AUSWIRKUNG AUF TREIBHAUSGASFLÜSSE (N_2O, CH_4)

(Barbara Kitzler)[32]

Lachgas (N_2O) ist ein klimarelevantes Spurengas, das Strahlung im Infrarotbereich effektiv absorbieren kann. Im Vergleich zu Kohlendioxid (CO_2) ist sein „Global Warming Potential“ ca. 298-fach stärker. Verglichen mit einer vorindustriellen Konzentration von 270±7 ppbv lag die atmosphärische Konzentration im Jahr 2005 bei 319±0,12 ppbv. Diese Zunahme ist vor allem auf die erhöhte mikrobielle Produktion infolge einer Intensivierung der Landwirtschaft (erhöhter Einsatz von Stickstoffdüngern) zurückzuführen [1].

N_2O kann durch verschiedene Prozesse im Boden (autotrophe oder heterotrophe Nitrifikation, Chemodenitrifikation, Nitrifizierer-Denitrifikation, Denitrifikation, Co-Denitrifikation, Ammonifikation) entweder produziert oder konsumiert werden [2]. Die Menge an produziertem N_2O hängt dabei maßgeblich von den Bodeneigenschaften, wie (Textur, verfügbarer Kohlenstoff, pH, mikrobielle Aktivität, Temperatur und Wassergehalt, ab [3].

[32] BFW, Seckendorff Gudent Weg 8, 1130 Wien, E-Mail: barbara.kitzler@bfw.ac.at

Methan (CH_4) ist 28mal klimaschädlicher als CO_2 (gemäß IPCC AR5, Betrachtungszeitraum 100 Jahre). Es trägt mit 20 % zur globalen Erderwärmung bei und wird vorwiegend in Reisfeldern, Sedimenten, Sumpfgebieten, Mooren und Mülldeponien, sowie durch Viehhaltung gebildet. Der Großteil des jährlich freigesetzten Methans wird photochemisch in der Atmosphäre und durch ‚methanotrophe' Bakterien in Böden wieder abgebaut (oxidiert).

Biokohle kann die N_2O Emissionen in Böden mindern und die Oxidationsraten von CH_4 erhöhen. Die Mechanismen, die dafür verantwortlich sind, wurden bisher jedoch immer noch nicht vollständig erfasst. Sie hängen u.a. von den Bodeneigenschaften, den Eigenschaften der applizierten Biokohle und deren Wechselwirkungen ab.

Eine Biokohleapplikation im Boden ändert z.B.

a. bodenphysikalische Eigenschaften (z.B. Gasdiffusivität, Aggregate, Wasserhaltefähigkeit) [4],

b. bodenchemische Eigenschaften (z.B. pH, Eh, Verfügbarkeit von organischem und mineralischem Stickstoff und gelöstem organischem Kohlenstoff),

c. bodenbiologische Eigenschaften (e.g. Struktur der mikrobiellen Gemeinschaft, mikrobielle Biomasse und deren Aktivität sowie die Aktivität der Makrofauna, Enzymaktivitäten) [5-7]

d. und damit auch die Produktion oder Aufnahme von N_2O und CH_4.

Eine generelle Aussage über eine Reduktion von N_2O durch Biokohle ist derzeit aufgrund der vielen verschiedenen Prozesse und Mechanismen, die dafür verantwortlich sind, noch nicht möglich [5, 8-11]. Ca. 50 % der Studien haben eine Reduktion von N_2O Emissionen beobachtet [12]. Es ist allerdings bisher noch nicht klar, wie lange das Treibhausgas- Reduktionspotential im Boden erhalten bleibt. Man kann daher komplexe Zusammenhänge zwischen Bodenart, Bodenwassergehalt, Art und Aufwandmenge der Biokohle, Art und Aufwandmenge des N-Düngers nur nach fallspezifischen Untersuchungen beurteilen.

In der Literatur lassen sich folgende „Hypothesen" einer Biokohleapplikation in Böden finden, welche für eine Änderung der Treibhausgasflüsse (Emission oder Aufnahme) verantwortlich sein können:

Verminderung der Stickstoffverfügbarkeit im Boden: Die poröse Struktur der Biokohle und das Vorhandensein von labilem, leicht flüchtigem Kohlenstoff sind geeignete Bedingungen für mikrobielles Wachstum und Aktivität, wodurch auch Stickstoff immobilisiert werden kann. Dadurch verringert sich der verfügbare Stickstoff für Nitrifikations- und Denitrifikationsprozesse [7]. Weiters können sich Nitrat, Ammonium, organischer Stickstoff und Enzyme an die Oberfläche von Biokohle anlagern (e.g. [13-15]).

Erhöhung des Boden pH: Abhängig von der Pyrolysetemperatur und dem Ausgangsmaterial der Biokohle kommt es zu einer Erhöhungen des pH Wertes. Dadurch kann sich die Aktivität der denitrifizierenden Mikroorganismen ändern [6, 7, 16], eine vollständige Denitrifikation gefördert und N_2O reduziert werden mit einer vermehrten Freisetzung des molekularen Stickstoffes (N_2) [5, 17].

Beeinflussung der Bodenstruktur: Biokohle kann die Porosität von Böden erhöhen, indem sie die Bodendichte verringert. Karhu et al. [18] fanden z.B. in einem schluffigen Lehm bei Zugabe von 9t ha^{-1} Biokohle aus Birkenholz eine Verringerung der Bodendichte um 4 %. Quin et al. [4] fanden eine Erhöhung der Porosität und der Porengröße in zwei lehmigen Böden, jedoch nicht in einem sandigen Boden. Abhängig vom Biokohle-Typ und der Menge der Applikation kommt es zu einer Zunahme der Belüftung des Bodens, einer Erhöhung der Porosität und der Porengröße [4]. Dadurch verringern sich die anaeroben Mikrosites, in denen Denitrifikation vorwiegend stattfindet. Auch die N_2O Emissionen werden weniger. Case et al. [19] nehmen jedoch an, dass die Belüftung des Bodens nur einen minimalen Effekt auf die Reduktion von N_2O hat. Aber auch eine Erhöhung der Methan (CH_4)-Aufnahme aufgrund erhöhter Belüftung wurde in Studien beobachtet [18, 20]. Durch die bessere Sauerstoffversorgung können oxidierende Bakterien besser mit Methan versorgt werden [21].

Bindung von N_2O und CH_4 an die Oberfläche der Biokohle: Es hat sich gezeigt, dass sich Gase (u.a. auch CH_4 und N_2O) an die Biokohleoberfläche anlagern können [10, 22]. Die Sorptionskapazität war am größten bei Biokohle, die bei >350° C produziert wurde, und erhöhte sich bei Biokohle aus Kiefernholz, das zwischen 350 und 700° C pyrolysiert wurde.

Mikrobielle Hemmstoffe: Organische Verbindungen, die mit Biokohle in Verbindung gebracht werden, können nicht nur auf Pflanzen hemmend wirken, sondern auch die Aktivität der Mikroorganismen vermindern und somit eine Produktion von N_2O und Oxidation von CH_4 unterbinden [23-26].

LITERATUR

[1] IPCC: Climate change 2007-the physical science basis. Contribution of Working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, Cambridge University Press, 2007

[2] Butterbach-Bahl K, E. M. Baggs, M. Dannenmann, R. Kiese & S. Zechmeister-Boltenstern: Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? Phil Trans R Soc B 368: 20130122. http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0122, 2013

[3] Baggs, E. M:Soil microbial sources of nitrous oxide: recent advances in knowledge, emerging challenges and future direction. Current Opinion in Environmental Sustainability. Vol 3, pp 321-327,2011

[4] Quin, P. R., A. L. Cowie, R. J. Flavel, B. P. Keen, L. M. Macdonald, S. G. Morris, B. P. Singh, I. M. Young & L. Van Zwieten: Oil mallee biochar improves soil structural properties – A study with x-ray micro-CT. Agriculture Ecosystems Environment, Vol 191, pp142-149, 2014

[5] Cayuela M. L., M. A. Sánchez-Monedero, A. Roig, K. Hanley, A. Enders & J. Lehmann: Biochar and denitrification in soils: when, how much and why does biochar reduce N_2O emissions? Scientific Reports 3, Article number: 1732, 2013

[6] Harter, J., H.-M. Krause, S. Schuettler, R. Ruser, M. Fromme, T. Scholten, A. Kappler & S. Behrens: Linking N_2O emissions from biochar-amended soil to the structure and function of the N-cycling microbial community. The ISME Journal, Vol 8, pp660-674, 2013

[7] Van Zwieten, L., B. P. Singh, S. W. L. Kimber, D. V. Murphy, L. M. Macdonald, J. Rust & S. Morris: An incubation study investigating the mechanisms that impact N_2O flux from soil following biochar application. Agriculture Ecosystems & Environment, 191: 53–62, 2014

[8] Ameloot N., P. Maenhout, S. De Neve & S. Sleutel: Biochar-induced N_2O reductions after field incorporation in a loam soil. Geoderma. 267. Pp. 10-16, 2016

[9] Chintala, R., R. Owen, T. Schumacher, K. Spokas, L. McDonald, S. Kumar, D. Clay, D. Malo & B. Bleakley: Denitrification kinetics in biomass- and biochar-amended soils of different landscape positions. Environ. Sci. Pollut. Res. 22 (7), 5152–5163, 2015

[10] Van Zwieten, L., B. Singh, S. Joseph, S. Kimber, A. Cowie, & K. Y. Chan: Biochar and emissions of non-CO_2 greenhouse gases from soil. In J. Lehmann and S. Joseph (eds). Biochar for Environmental Management: Science and Technology, Earthscan, London, pp227-249, 2010

[11] Clough, T. J., L. M. Condron, C. Kammann & C. Müller: A review of biochar and soil nitrogen dynamics. Agronomy, 3, 275–293, 2013

[12] Cayuela, M. L., S. Jeffery & L. van Zwieten**:** The molar H: Corg ratio of biochar is a key factor in mitigating N2O emissions from soil. AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT 202: 135-138, 2015

[13] Dempster D. N., D. L. Jones & D. V. Murphy: Organic nitrogen mineralization in two contrasting agroecosystems is unchanged by biochar addition. Soil biology and Biochemistry, Vol 48, pp47-50, 2012

[14] Kameyama, K., T. Miyamoto, T. Shiono & Y. Shinogi: Influence of sugarcane bagasse-derived biochar application on nitrate leaching in calcaric dark red soil. Journal of Environmental Quality, 41, 1131–1137 2012

[15] Prommer, J., W. Wanek, F. Hofhans, D. Trojan, P. Offre, T. Urich, C. Schleper, S. Sassmann, B. Kitzler, G. Soja & R. C. Hood-Nowotny: Biochar decelerates soil organic nitrogen cycling but stimulates soil nitrification in a temperate arable field trial. PLoS One 9, 1–16, 2014

[16] Wang C., H. Lu, D. Dong, H. Deng, P. J. Strong, H. Wang & W. Wu: Insight into the Effects of biochar on Manure Composting: Evidence Supporting the Relationship between N_2O Emission and Denitrifying Community. Environmental Science and technology, Vol 47, pp 7341-7349, 2013

[17] Cayuela, M. L., L. van Zwieten, B. P. Singh, S. Jeffery, A. Roig & M. A. Sanchez-Monedero: Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT 191, SI**:** 5-16, 2014

[18] Karhu, K., T. Mattila, I. Bergström & K. Regina: Biochar addition toagricultural soil increased CH4uptake and water holding capacity—resultsfrom a short-term pilot field study. Agric. Ecosyst. Environ. 140, 309–313, 2011

[19] Case S. D. C., N. P. McNamara, D. S. Reay & J. Whitaker: The effect of biochar addition on N2O and CO2 emissions from a sandy loam soil – the role of soil aeration. Soil Biol. Biochem. 51, 125-134, 2012

[20] Rondon M, J. A. Ramirez & J. Lehmann: Charcoal additions reduce net emissions of greenhouse gases to the atmosphere. In: Proceedings of the 3rd USDA Symposium on Greenhouse Gases and Carbon Sequestration in Agriculture and Forestry; 2005 Mar 21–24; Baltimore, MD. Baltimore, MD: University of Delaware. p 208, 2005

[21] Schimmelpfennig S., C. Müller, L. Grünhage, C. Koch & C. Kammann: Biochar, hydrochar and uncarbonized feedstock application to permanent grassland – effects on greenhouse gas emissions and plant growth. Agriculture, Ecosystems & Environment, 191, 39–52, 2014

[22] Cornelissen, G., V. Martinsen, V. Shitumbanauma, V. Alling, G. Breedveld, D. Rutherford, M. Sparrevik, S. Hale, A. Obia & J. Mulder: Biochar effect on maize yield and soil characteristics in five conservative farming sites in Zambia. Agronomy, vol. 3, pp 256-274, 2013

[23] Olsson M, O. Ramnas & G. Peterson G.Specific volatile hydrocarbons in smoke from oxidative pyrolysis of softwood pellets. J Anal Appl Pyrol 71:847–854, 2004

[24] Graber, E., Y. Meller Harel, M. Kolton, E. Cytryn, A. Silber, D. Rav David, L. Tsechansky, M. Borenshtein & Y. Elad: Biochar impact on development and productivity of pepper and tomatoe grown in fertigated soil-less media. Plant and Soil. Vol. 337, pp481-496, 2010

[25] Clough, T. J., & L. M. CondronBiochar and the nitrogen cycle: introduction. Journal of Environmental Quality, 39, 1218–1223, 2010

[26] Spokas, K. A., W. C. Koskinen, J. M. Baker & D. C. Reicosky: Impacts of woodchip biochar additions on greenhouse gas production and sorption/degradation of two herbicides in a Minnesota soil, Chemosphere 77, 4: 574-581, 2009

12.3 ANWENDUNG VON BIOKOHLE

12.3.1 BIOKOHLE IN DER LANDWIRTSCHAFT

12.3.1.1 BIOKOHLE IM ACKERBAU

(Heide Spiegel, Caroline Spann)[33]

Die Anwendung von Biokohle im Ackerbau zur Verbesserung von Qualität und klimarelevanter Kohlenstoff-Speicherung des Bodens wird zurzeit intensiv erforscht [1]. Dabei kommen Bio- und Hydrokohlen verschiedenster Zusammensetzung zum Einsatz und werden vorwiegend in Gefäß- aber auch in Feldversuchen getestet. Dieses Kapitel will basierend auf wissenschaftlichen Veröffentlichungen einen kurzen Überblick über Stärken und Schwächen der Anwendung von Biokohlen im Ackerbau in gemäßigten Klimagebieten geben.

Kloss et al. [2] machten Gefäßversuche mit Biokohlen (Pyrolysetemperatur 525° C) aus Rebschnitt, Weizenstroh und gemischten Holzhackschnitzeln auf Tschernosem, Braunerde und Planosol (Österreich). Nach sieben Monaten Biokohlen(BK)-Anwendung für die Kulturen Senf und Gerste fanden sie, dass die BK-Anwendung auf Böden der gemäßigten Zone den Nährstoffhaushalt des Bodens als auch den Ertrag erheblich beeinflusst. Der tatsächliche Einfluss hängt vom Ausgangsmaterial, der Pyrolysetemperatur und von der Aufwandmenge der BK sowie vom Bodentyp ab. Auch Alburquerque et.al. [3] fanden in Spanien aufgrund von Gefäßexperimenten mit Bewässerung auf einer schwach sauren Parabraunerde mit hohem Sandanteil (80 %), dass die BK Effekte auf verschiedene chemische und physikalische Bodenparameter von der Aufwandmenge und vom Typ der BK abhängen. Insbesondere Weizenstroh-BK haben diese Forscher in ihrer Analyse berücksichtigt.

DIE LITERATUR NENNT UNTER ANDEREM FOLGENDE VERÄNDERUNGEN NACH EINSATZ VON BIOKOHLE:

Kloss et al. [2] stellten sieben Monate nach BK-Aufbringung einen Anstieg des pH Wertes in Böden mit sauren Anfangs-pH-Werten (Planosol: pH 5,4) und Braunerde (pH: 6,6) fest. Auch im Tschernosem (pH7,4) stieg der pH Wert signifikant auf 7,6 an, mit allerdings nur 3 % Hackschnitzel-BK. Das entspricht einer Aufwandmenge von 90 t ha^{-1}, die in 20 cm eingearbeitet werden. Auch Alburquerque et.al. [3] berichteten über einen pH-Anstieg – je nach Anwendungsmenge von pH 6,5 auf max. 8,5. Dieses Team wertete ihr Ergebnis negativ, weil z.B. dadurch die Pflanzenverfügbarkeit von Mikronährstoffen verringert wird. Auch Kloss et al. [2] stellten eine verminderte Aufnahme der Mikronährstoffe Cu, Fe, Mn, Zn in die Pflanze fest. Andererseits kann die Pflanzen-Verfügbarkeit und Aufnahme von Mo durch eine pH-Wert Erhöhung ansteigen, wobei eventuelle Toxizitätsgrenzen (z.B. in Tierfutter) beachtet werden müssen.

Kloss et al. [2] ermittelten nach BK-Anwendung im Zusammenhang mit dem pH-Wert-Anstieg eine erhöhte Kationen-Austauschkapazität (KAK). Diese trat v.a. im Planosol, nicht aber im Tschernosem, und in der Braunerde nur nach Anwendung von 3 % Hackschnitzel-BK auf. Normalerweise nimmt die KAK der BK mit steigenden Pyrolysetemperaturen ab.

[33] Institut für Nachhaltige Pflanzenproduktion, AGES, Spargelfeldstraße 191, 1220 Wien; E-Mail: adelheid.spiegel@ages.at

Alburquerque et al. [3] berichteten über eine Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit nach BK-Anwendung. Auch Kloss et al. [2] fanden diese im Planosol und in der Braunerde nur mit 3 % Hackschnitzel BK, nicht aber im Tschernosem,

Bezüglich der Nährstoffdynamik ist festzustellen, dass eine Erhöhung des N-Mineralisierungspotentials nur im Planosol auftrat [2]. Dies könnte ein Effekt des angestiegenen pH-Werts sein, da auch anzunehmen ist, dass die mikrobielle Aktivität in einem sauren Boden mit steigendem pH ansteigt. Kloss et al. [2] fanden das C:N Verhältnis im Boden erhöht, was allerdings signifikant v.a. mit 3 % Hackschnitzel-BK auf allen Böden festzustellen war. Dies weist zwar auf eine geringere N-Verfügbarkeit hin, es dürften allerdings verminderte Erträge in diesen Versuchen nicht in erster Linie auf eine N-Immobilisierung zurückzuführen gewesen sein. Alburquerque et.al. [3] stellten fest, dass die Zugabe von BK zu einem Rückgang des Nitratgehalts im Boden führte, wobei die Reduktion mit höherer Biokohle-Menge zunahm. Mit BK in Zusammenhang stehende N-Adsorptionsprozesse lassen vermuten, dass BK als Material gesehen werden kann, das Stickstoff langsam freisetzt und N-Verluste durch Gasemissionen oder Nitratauswaschung vermindert. Gleichzeitig können diese Adsorptionsprozesse im Boden dazu führen, dass ein kurzfristiger N-Mangel für Pflanzen entsteht.

Bezüglich der Pflanzennährstoffe P und K stellten Kloss et al. [2] eine Erhöhung der P_{CAL}-Gehalte im Boden, v.a. im Planosol, nicht aber im Tschernosem und in der Braunerde nur nach Anwendung von 3 % Hackschnitzel BK fest. Auf allen Böden führte die BK-Anwendung zu einer signifikanten und starken Erhöhung der K_{CAL}-Gehalte.

Zum Teil fanden Kloss et al. [2] das C_{org} und Alburquerque et al. [3] das DOC nach BK-Anwendung erhöht. Allgemein berichteten Alburquerque et al. über eine Verbesserung physikalischer Bodenparameter nach BK Anwendung, v.a. hat sich die Feldkapazität erhöht und die Rohdichte verringert. Die größten Einflüsse zeigten hier Biokohle aus Weizenstroh und aus Kiefer-Holzhackschnitzeln. Diese Materialien haben geringe Dichten und daher mehr Kapazität für Wasserspeicherung. Eine Verringerung der Rohdichte im Boden kann Wurzelwachstum und -entwicklung begünstigen, speziell bei Sonnenblumen durch geringeren Widerstand bei der Durchwurzelung. In diesem Experiment gab es keinen statistisch signifikanten Effekt der veränderten Feldkapazität und Schüttdichte auf den prozentuellen Wurzelanteil.

Die Effekte von BK-Anwendung auf Pflanzenwachstum und Erträge sind abhängig von den ursprünglichen Nährstoffgehalten im Boden und von den Eigenschaften der BK, wobei insbesondere nährstoffarme und C-reiche Materialien mit einer niedrigen Mineralisierungsrate negative Effekt auf die Nährstoffverfügbarkeit haben können [3]. Die Autoren fanden sowohl Ertragseinbußen als auch Ertragserhöhungen (z.B. bei Weizenstroh-BK nur bei hohen Aufwandmengen von 5 und 7,5 % BK). Kloss et al. [2] registrierten mehrheitlich Ertragseinbußen bei Senf und Gerste. Laut Alburquerque et al. [3] stellten viele Studien gute Ertrags-Wirkungen von BK in Kombination mit einer Mineraldüngung fest.

In einer weltweiten Meta-Analyse von Studien fassten Jeffery et al. [4] die Ertragseffekte von Biokohle in Abhängigkeit von der Aufwandmenge, der Ernteprodukte und der Ausgangsmaterialien zusammen. Die Ergebnisse zeigen, dass im Durchschnitt Aufwandmengen von über 5t ha-1 (und weniger als 150 t ha-1) zur Ertragssteigerungen führten. Diese betrugen im gesamten Durchschnitt +18 %. Allerdings wurden in mehr als 90 % der Studien nur einjährige Versuchsergebnisse berücksichtigt.

Woolf et al. [5] haben im Zuge der Klimaschutz-Debatte eine maximale Aufwandmenge von 50 t ha-1 vorgeschlagen. Es ist allerdings zu bezweifeln, dass so hohe Aufwandmengen wirtschaftlich sind [4]. Bei Anwendung von Biokohle erzielten Weizen, Mais und Sojabohne durchschnittliche Ertragssteigerungen von 17, 19 und 22 %, höhere Erträge wurden bei Salat, Radieschen, Futtergras, Weißklee und Sorghum-Hirse gewonnen. Dagegen führte die Anwendung von Biokohle bei Rotklee, Bohne, Hafer, Zuckerrübe und Gras zu keinen signifikanten Ertragseffekten. BK-Ausgangsmaterialien wie Kuhmist, Hühnermist, Maisstroh, Abwasser-Schlamm sowie Holz, Papierzellstoff und Hackschnitzel beeinflussten den Ertrag im Durchschnitt positiv. Grund dafür dürfte eine Kombination aus Nährstoffeffekten (z.B. BK aus Wirtschaftsdüngern) und strukturellen Effekte sein, die die Wasserhaltekapazität erhöhen und das Bodenleben fördern.

Jeffery et al. [4] halten die Kalkungseffekte bzw. pH-Wert-Erhöhungen in sauren Böden als zwei der wichtigsten Gründe für die Ertragssteigerungen nach Biokohleanwendung, da die größten positiven Effekte in sauren Böden (zwischen pH<4 bis 5,5) erzielt wurden. Keine signifikanten Effekte konnten im Durchschnitt in schwach sauren, neutralen bis schwach alkalischen Böden festgestellt werden (pH zwischen 5,6 und 8,0).

ZUSAMMENFASSUNG:

Mögliche Stärken der Anwendung von Biokohle:

- Anstieg des (im Falle von stark sauren Böden) pH-Wertes (z.B. durch Erhöhung der mikrobiellen Aktivität, Erhöhung der Verfügbarkeit von Nährstoffen, Verminderung der Toxizität von Schadstoffen)
- Erhöhung der KAK
- (Erhöhung des N-Mineralisierungspotentials)
- Erhöhung der P_{CAL}-Gehalte
- Erhöhung der K_{CAL}-Gehalte
- Erhöhung des C_{org}
- Erhöhung des DOC
- Erhöhung der Feldkapazität (Wasserverfügbarkeit)
- Abnahme der Rohdichte
- Ertragserhöhungen
- Verminderung von Nährstoff-Verlusten, z.B.
  - N_2O Emissionen
  - gasförmige NH3-Verluste
  - N- und P-Auswaschung

- Verminderung von Treibhausgas-Emissionen
- Erhöhung der Habitatfunktion des Bodens für Bodenorganismen

Mögliche Schwächen der Anwendung von Biokohle:

- Anstieg des pH-Wertes (wenn z.B. die Pflanzenverfügbarkeit von Nährstoffen, z.B. P), insbesondere auch Mikronährstoffen (Cu, Fe, Mn, Zn), verringert wird oder die Verfügbarkeit und Aufnahme von Mo stark erhöht werden
- Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit (hoher Salzgehalt)
- Erhöhung des C:N Verhältnisses, N-Immobilisierung
- Abnahme des (pflanzenverfügbaren) Nitratgehalts im Boden
- Ertragseinbußen (bei unsachgemäßer Anwendung)
- Schadstoffeinträge (bei nicht zertifizierten Kohlen)

LITERATUR

[1] Lehmann J. & S. Joseph: Biochar for Environmental Management. Science, Technology and Implementation. Second Edition. Routledge, London and New York, 2015

[2] Kloss S., F. Zehetner, B. Wimmer, J. Buecker, F. Rempt & G. Soja: Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science 177:*3-15, 2014

[3] Alburquerque, J. A., J. M. Calero, V. Barrón, J. Torrent, M. C. del Campillo A. Gallardo & R. Villar: Effects of biochars produced from different feedstocks on soil properties and sunflower growth. *J. Plant Nutr. Soil Sci., 177*: 16–25, 2014

[4] Jeffery S, D. Abalos, K. A. Spokas& F. G. A. Verheijen : Biochar effects on crop yield. In: Lehmann J., Joseph S. (Eds.): Biochar for Environmental Management. Science, Technology and Implementation. Second Edition. Routledge, London and New York, 301-325, 2015

[5] Woolf, D., J. E. Amonette, F. A. Street-Perrott, J. Lehmann & S. Joseph: Sustainable Biochar to mitigate global climate change. http://doi.org/10.1038/ncomms1053, Nature Communications 1, 2015

12.3.1.2 BIOKOHLE FÜR DAUERKULTUREN

(Gerhard Soja)[34]

Zwischen ausdauernden Kulturen und Biokohle besteht in zweierlei Hinsicht eine betrachtenswerte Beziehung: einerseits haben gerade die Böden von Weingärten und Obstkulturen, bei denen in der Vergangenheit auf Begrünung verzichtet worden ist, ein signifikantes Defizit an C_{org} im Boden. Andererseits fallen bei den jährlichen Schnittmaßnahmen signifikante Reb- und Obstholzrestmassen

[34] Energy Department, Environmental Resources and Technologies, AIT Austrian Institute of Technology GmbH, Konrad Lorenz-Str. 24, 3430 Tulln; E-Mail: gerhard.soja@ait.ac.at

an, welche sich als Inputmaterial für Pyrolysereaktoren eignen. Während diese Reststoffe früher oft am Grundstück verbrannt worden sind und damit ein Großteil der Nährstoffe verloren gegangen ist, überwiegt nun die Einhäckselung. Zwar können auf diese Weise die Nährstoffe im Holz besser rezykliert werden, doch kann die organische Masse wegen der baldigen Mineralisierung C_{org} nicht so dauerhaft anreichern, wie dies mit abbauresistenten Karbonisaten der Fall ist. Zudem besteht die Gefahr, dass am alten Holz überwinternde Krankheitserreger auf diese Weise eher zur Neuinfektion in der nächsten Vegetationsperiode beitragen können.

Der hohe Anfall von Schnittholz bei den jährlichen Pflegemaßnahmen in Wein- und Obstkulturen bietet reichliche Mengen (2,5 – 4,5 t ha^{-1} mit rund 50 % TM-Gehalt; [1]) an potentiellem Inputmaterial für pyrolytische Karbonisierungen. Zu beachten ist, dass die alternative Rückführung des Schnittholzes auch die Nährstoffen direkt rückführen würde (ca. 11 kg N, 15 kg K_2O, 3 kg P_2O_5 und 2 kg MgO pro ha; [1]). Bei der Pyrolyse bleiben diese Nährstoffe mit Ausnahme von N jedoch Großteils erhalten und können daher ebenfalls wieder in den Boden rückgeführt werden, wenngleich auch nur unter wesentlich langsamerer Freisetzung. Für eine Pyrolyse eignen sich sowohl Rebschnittholz [2] als auch Schnittrückstände von Apfelkulturen [3]. Eine Verbesserung des Nährstoffangebots im Boden war bei jungen Apfelsetzlingen in Sandboden wirksamer als in Lehmboden [4]. Dies entspricht den allgemeinen Erfahrungen, dass die Anwendung von Biokohle in schlecht versorgten, sandigen und degradierten Böden positivere Wirkungen zeigt als in fruchtbareren Böden [5].

Zwar kann auch unpyrolysiertes Rebholz durch seine relativ schlechte Zersetzbarkeit zur Bildung von Dauerhumus beitragen (ca. 300 kg ha^{-1}; [1]), doch steht im Falle der Pyrolyse derselben Schnittholzmenge eine Biokohle-Ausbeute von rund 500 kg ha^{-1} gegenüber. Diese liefert einen langfristigen Beitrag zur Erhöhung des C_{org}-Gehaltes über einen Zeitraum von Jahrhunderten bis Jahrtausenden [6]. Durch die dauerhafte C-Bindung im Boden mittels Biokohle aus dem eigenen Betrieb können Weinbaubetriebe ihren CO_2-Fußabdruck signifikant verringern; eine Studie von Rosas et al. [7] berechnet eine Reduktion von 18 g CO_2e pro Flasche Wein.

Wein- und Obstbaubetriebe leiden zwar unter kurzfristigen Trockenperioden weniger als Ackerbaubetriebe, doch wirken sich langfristige Wasserdefizite auch auf die Qualität und Erntemenge von Trauben und Obst aus. Eine Verbesserung der Wasserversorgung in Biokohle-versorgten mediterranen Weinanlagen beobachteten Baronti et al. [8] sowie Genesio et al. [9]. Abgesehen von diesen bekannten bodenphysikalischen Effekten von Biokohle könnte der spezifische Aufbau des Rebholzes [2], dessen Gefäßstruktur auch nach Pyrolyse erhalten bleibt [10], zur Erhöhung des pflanzenverfügbaren Wassers während Trockenstressperioden beitragen.

Obst- bzw. Weinkulturen können von erhöhter Nährstoffverfügbarkeit durch Biokohle profitieren. Allerdings darf die Applikationsdosis nicht zu hoch sein (47 t ha^{-1}), um Sickerwasserverluste zu vermeiden [11], aber auch nicht zu nieder (8 t ha^{-1}), um bei alten Kulturen signifikante Effekte zu beobachten [12]. Ebenso heikel ist die richtige Aufwandmenge, wenn es um die Verringerung von Nitratverlusten geht: Bai et al. [13] fanden bei 10 t ha^{-1} keine signifikante Auswirkung von Biokohle auf NH_4^+ und NO_3^- im Boden; Ventura et al. [14] beobachteten bei derselben Applikationsmenge erst im zweiten Versuchsjahr eine signifikante Reduktion der Nitratauswaschung um 75 %. 10 t ha^{-1} erwiesen sich auch bei den Analysen von Verhoeven und Six [15] als zu wenig, um die ansonsten nach Biokohle-Gaben häufig beobachteten Reduktionen der Lachgas-Emissionen [16] in einem Versuchsweingarten zu reduzieren.

Die in einigen Untersuchungen an einjährigen Kulturen beobachtete Reduktion des Infektionsdrucks durch bodenbürtige Krankheiten war auch bei Obstkulturen bereits Gegenstand von Untersuchungen.

Hinweise auf einen verbesserten Gesundheitszustand nach der Verwendung von Biokohle fanden [17] bei Pfirsich und Wang et al. [18] bei Apfel, wenn die Selbstunverträglichkeit der Kulturen bei Neuauspflanzung durch bodenbürtige Pilze bedingt war. Bei der Untersuchung von pflanzenparasitären und nicht-parasitären freilebenden Nematoden in Weingartenböden beobachteten Rahman et al. [19] eine Verschiebung in Richtung der nicht-parasitären Fadenwürmer.

Infolge vergangener und aktueller Fungizid-Anwendungen können Böden sowohl in Weingärten [20] als auch in Obstkulturen [21] erhöhte Cu-Konzentrationen aufweisen. Bei der Verwendung von Rebholz, welches im vergangenen Jahr mit Cu-Präparaten behandelt worden ist, als Ausgangsmaterial für die Biokohle-Herstellung aus Weingärten ist auf die Cu-Gehalte des Produkts besonders zu achten [22]. Immobilisierungsmaßnahmen mit Biokohle haben bislang keine eindeutigen Erfolge gebracht, um die Bioverfügbarkeit von Cu zu reduzieren [23]. Dies wird unter anderem darauf zurückgeführt, dass die Affinität von Cu zu Biokohle geringer ist als die von anderen Schwermetallen wie Pb oder Cr [24], während die Neigung von Cu mit organischen Bestandteilen der Bodenlösung Komplexe einzugehen stark ausgeprägt ist [25]. In Zukunft wird auf die ökotoxikologische Wirkung verschiedener Cu-Spezies mehr Wert gelegt werden müssen, um das tatsächliche Gefährdungspotential von erhöhten Cu-Konzentrationen für Boden-Ökosysteme abzuschätzen.

LITERATUR

[1] Walg, O.: Thermische Rebholzverwertung, *Der Winzer* 01/2013

[2] Pituello, C., O. Francioso, G. Simonetti, A. Pisi, A. Torreggiani, A. Berti & F. Morari: Characterization of chemical-physical, structural and morphological properties of biochars from biowastes produced at different temperatures, *Journal of Soils and Sediments.* 15, 792-804, 2015

[3] Popescu, C. M., C. A. S. Hill, R. Anthony, G. Ormondroyd & S. Curling: Equilibrium and dynamic vapour water sorption properties of biochar derived from apple wood, *Polymer Degradation and Stability.* 111, 263-268, 2015

[4] Street, T. A., R. B. Doyle& D. C. Close: Biochar Media Addition Impacts Apple Rootstock Growth and Nutrition, *Hortscience.* 49, 1188-1193, 2014

[5] Jeffery, S., D. Abalos, K. A. Spokas, & F. G. A. Verheijen: Biochar effects on crop yield. pp. 301-325. In: Biochar for Environmental Management. Lehmann, J.: Joseph, S. (eds.), Earthscan / Routledge, London, New York, 2015

[6] Lehmann, J., S. Abiven, M. Kleber, G. Pan, B. Pal Singh, S. Sohi, & A. R. Zimmermann: Persistence of biochar in soil. pp. 235-282. In: Biochar for Environmental Management. Lehmann, J.: Joseph, S. (eds.), Earthscan / Routledge, London, New York, 2015

[7] Rosas, J. G., N. Gomez, J. Cara, J. Ubalde, X. Sort, & M. E. Sanchez: Assessment of sustainable biochar production for carbon abatement from vineyard residues, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis.* 113, 239-247, 2015

[8] Baronti, S., F. P. Vaccari, F. Miglietta, C. Calzolari, E. Lugato, S. Orlandini, R. Pini, C. Zulian, & L. Genesio: Impact of biochar application on plant water relations in Vitis vinifera (L.), *European Journal of Agronomy.* 53, 38-44, 2014

[9] Genesio, L., F. Miglietta, S. Baronti, & F. P. Vaccari: Biochar increases vineyard productivity without affecting grape quality: Results from a four years field experiment in Tuscany, *Agriculture Ecosystems & Environment.* 201, 20-25, 2015

[10] De la Rosa, J. M., M. Paneque, A. Z. Miller & H. Knicker: Relating physical and chemical properties of four different biochars and their application rate to biomass production of Lolium perenne on a Calcic Cambisol during a pot experiment of 79 days, *Science of the Total Environment.* 499, 175-184, 2014

[11] Hardie, M. A., G. Oliver, B. E. Clothier, S. A. Bound, S. A. Green & D. C. Close: Effect of biochar on nutrient leaching in a young apple orchard, *Journal of Environmental Quality.* 44, 1273-1282, 2015

[12] Schmidt, H. P., C. Kammann, C. Niggli, M. W. H. Evangelou, K. A. Mackie & S. Abiven: Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: Influences on plant growth, nutrient uptake, plant health and grape quality, *Agriculture Ecosystems & Environment.* 191, 117-123, 2014

[13] Bai, S. H., C. Y. Xu, Z. H. Xu, T. J. Blumfield, H. T. Zhao, H. Wallace, F. Reverchon & L. Van Zwieten: Soil and foliar nutrient and nitrogen isotope composition (delta N-15) at 5 years after poultry litter and green waste biochar amendment in a macadamia orchard, *Environmental Science and Pollution Research.* 22, 3803-3809, 2015

[14] Ventura, M., G. Sorrenti, P. Panzacchi, E. George & G. Tonon: Biochar Reduces Short-Term Nitrate Leaching from A Horizon in an Apple Orchard, *Journal of Environmental Quality.* 42, 76-82, 2013

[15] Verhoeven, E. & J. Six: Biochar does not mitigate field-scale N2O emissions in a Northern California vineyard: An assessment across two years, *Agriculture Ecosystems & Environment.* 191, 27-38, 2014

[16] Thomazini, A., K. Spokas, K. Hall, J. Ippolito, R. Lentz & J. Novak: GHG impacts of Biochar: Predictability for the same biochar, *Agriculture Ecosystems & Environment.* 207, 183-191, 2015

[17] Atucha, A. & G. Litus: Effect of biochar Amendments Peach Replant Disease, *Hortscience.* 50, 863-868, 2015

[18] Wang, Y. F., F. B. Pan, G. S. Wang, G. D. Zhang, Y. L. Wang, X. S. Chen. & Z. Q. Mao: Effects of biochar on photosynthesis and antioxidative system of Malus hupehensis Rehd. seedlings under replant conditions, *Scientia Horticulturae.* 175, 9-15, 2014

[19] Rahman, L., M. A. Whitelaw-Weckert & B. Orchard: Impact of organic soil amendments, including poultry-litter biochar, on nematodes in a Riverina, New South Wales, vineyard, *Soil Research.* 52, 604-619, 2014

[20] Mackie, K., H. Schmidt, T. Mueller & E. Kandeler: Cover crops influence soil microorganisms and phytoextraction of copper from a moderately contaminated vineyard, *Science of the Total Environment.* 500, 34-43, 2014

[21] Wang, Q., J. Liu & Q. Liu: Contamination of apple orchard soils and fruit trees with copper-based fungicides: sampling aspects, *Environmental Monitoring and Assessment.* 187, 2015

[22] Kloss, S., F. Zehetner, J. Buecker, E. Oburger, W. W. Wenzel, A. Enders, J. Lehmann & G. Soja: Trace element biogeochemistry in the soil-water-plant system of a temperate agricultural soil amended with different biochars. Environmental Science and Pollution Research 22, 4513-4526, 2015

[23] MacKie, K. A., S. Marhan, F. Ditterich, H. P. Schmidt & E. Kandeler: The effects of Biochar and compost amendments on copper immobilization and soil microorganisms in a temperate vineyard, *Agriculture Ecosystems & Environment.* 201, 58-69, 2015

[24] Caporale, A. G., M. Pigna, A. Sommella & P. Conte: Effect of pruning-derived biochar on heavy metals removal and water dynamics, *Biology and Fertility of Soils.* 50, 1211-1222, 2014

[25] Amery, F., F. Degryse, W. Degeling, E. Smolders & R. Merckx: The copper-mobilizing-potential of dissolved organic matter in soils varies 10-fold depending on soil incubation and extraction procedures, *Environmental Science & Technology.* 41, 2277-2281, 2007

12.3.1.3 BIOKOHLE IN DER GRÜNLANDWIRTSCHAFT

(Andreas Bohner)[35]

Grünlandökosysteme unterscheiden sich von Acker- und Waldökosystemen in vielfältiger Weise. Der erfolgreiche Einsatz von Biokohle in der Grünlandwirtschaft erfordert Kenntnisse über die charakteristischen Eigenschaften typischer Grünlandböden. Derzeit fehlen publizierte Studien über die Langzeitwirkung von Biokohle im österreichischen Dauergrünland.

Die Art der Bewirtschaftung (Mahd oder Beweidung) und die Intensität der Nutzung (Anzahl der Schnitte oder Weidegänge pro Jahr) haben einen großen Einfluss auf den Zustand der Grünlandböden. Daher muss zwischen Wirtschaftsgrünland (gedüngte mehrmähdige Wiesen, Kulturweiden und Mähweiden) und Extensivgrünland (meist ungedüngte einmähdige Wiesen, Streuwiesen, Hutweiden, Almen und Bergmähder) unterschieden werden. Das Dauergrünland wird – im Gegensatz zu den Feldfutterbeständen oder Wechselwiesen – permanent als Wiese, Weide oder Mähweide genutzt. Es findet weder ein Umbruch des Bodens noch eine ackerbauliche Nutzung innerhalb von zehn Jahren statt [1]. Die nachfolgenden Ausführungen gelten ausschließlich für Böden des Dauergrünlandes.

Die Böden des Dauergrünlandes weisen spezifische Eigenschaften auf [2]. Sie sind im Oberboden meist sehr humusreich und haben eine hohe Aggregatstabilität. Mit einem hohen Humusgehalt sind in der Regel auch eine große Wasserhaltekapazität und ein hoher Gesamtgehalt an Stickstoff, Schwefel und Phosphor im Boden verbunden. Der Kaliumgehalt ist sehr wesentlich vom Ausgangsmaterial der Bodenbildung abhängig. Grünlandböden mit wenig verwitterten Glimmermineralen weisen von Natur aus relativ hohe Kaliumgehalte auf. In humusreichen Grünlandböden mit einem pH-Wert (pH $CaCl_2$) über 5.0 ist die effektive Kationenaustauschkapazität meist relativ hoch. In den Oberböden des Wirtschaftsgrünlandes beträgt das C:N-Verhältnis 9 bis 12:1 und der pH-Wert befindet sich häufig im Optimalbereich (pH $CaCl_2$: 6.2-5.0). In den Oberböden des Extensivgrünlandes ist das C:N-Verhältnis in der Regel weiter als 12:1 und die

[35] HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 8952 Irdning-Donnersbachtal; E-Mail: andreas.bohner@raumberg-gumpenstein.at

Böden können auch niedrige pH-Werte (pH $CaCl_2$: < 5.0) aufweisen. Die Böden des Wirtschaftsgrünlandes sind im Oberboden oft verdichtet. Vor allem in kühlen, niederschlagreichen Gebieten neigen verdichtete Grünlandböden wegen der gehemmten Infiltration von Niederschlag- und Schneeschmelzwasser zur Bildung von Staunässe. Die N_2O-Emissionen verdichteter Böden sind vor allem bei häufiger Staunässe und reichlicher Düngung erhöht[3]. Bei standortangepasster Grünlandbewirtschaftung und durchschnittlichen Witterungsverhältnissen sind die Nährstoffausträge mit dem Sickerwasser unter Dauergrünland relativ gering [4].

Im Dauergrünland sind die Einsatzmöglichkeiten von Biokohle auf Grund der spezifischen Bodeneigenschaften eingeschränkt. Folgende Möglichkeiten bieten sich an:

- In stark sauren Grünlandböden (pH $CaCl_2$: < 5.0) ist durch Zufuhr von Biokohle eine Erhöhung des pH-Wertes möglich. Eine pH-erhöhende Wirkung durch Ausbringung von Biokohle wurde in vielen Studien festgestellt (z.B. [5]).

- In Grünlandböden mit niedrigen Gehalten an pflanzenverfügbarem Kalium kann durch Zufuhr von Kalium-reicher Biokohle (Biokohle aus Pflanzenmaterial) der Kaliumgehalt im Boden rasch erhöht, der Kaliumgehalt in den Pflanzen deutlich gesteigert und das Pflanzenwachstum gefördert werden [6]. Biokohle kann eine wertvolle Kaliumquelle für Grünlandpflanzen sein [7].

- Phosphorreiche Biokohle (Biokohle aus tierischen Ausgangsstoffen oder Klärschlamm) kann vor allem in sauren Grünlandböden die Phosphorernährung der Pflanzen verbessern, wenn Biokohle in Verbindung mit Stallmist oder Kompost ausgebracht wird. Durch den Biokohle induzierten pH-Anstieg wird die mikrobielle Aktivität im Oberboden erhöht und in der Folge auch die Mineralisierung von organischem Phosphor intensiviert. Allerdings fehlen diesbezüglich Langzeitversuche. Die Ergebnisse mehrerer Studien zeigen, dass Biokohle eine wertvolle Phosphorquelle für Pflanzen sein kann, z.B.[8].

- Durch Zufuhr von Biokohle kann das Kleewachstum (insbesondere Rot-Klee, *Trifolium pratense*) gefördert werden, vor allem in Grünlandböden mit niedrigen Gehalten an pflanzenverfügbarem Kalium [9].

- In stark wechselfeuchten Grünlandböden können Stickstoffverluste durch N_2O-Emissionen aus dem Boden durch Zufuhr von Biokohle reduziert werden. Eine Reduktion der Lachgas-Emissionen aus dem Boden durch den Einsatz von Biokohle wurde in zahlreichen Studien festgestellt (z.B. [10]). Taghizadeh-Toosi et al. [11] konnten in einem Weideboden in Neuseeland durch Zufuhr von Biokohle (30 t ha^{-1}; Biokohle aus Monterey-Kiefer, *Pinus radiata*) die N_2O-Emissionen aus Urin-Geilstellen um mehr als 50 % reduzieren.

- In seichtgründigen, humusarmen, sandigen und/oder skelettreichen Grünlandböden kann durch Zufuhr von Biokohle die pflanzenverfügbare Bodenwassermenge erhöht und somit auch die Wasserversorgung der Grünlandpflanzen verbessert werden. Eine Erhöhung der Wasserhaltekapazität im Boden durch Ausbringung von Biokohle wurde in vielen Studien festgestellt (z.B. [12]).

Die Zufuhr von Biokohle mit einem hohen C:N-Verhältnis (über ca. 50:1) kann kurzfristig zu einer Stickstoff-Immobilisierung im Boden und zu einer verminderten Stickstoffaufnahme der Pflanzen führen [13]. Dies kann verhindert oder zumindest in seinen Auswirkungen deutlich reduziert werden,

wenn Biokohle in Verbindung mit Wirtschaftsdüngern (Stallmist, Kompost, Gülle, Jauche) ausgebracht wird. Biokohle kann in der Grünlandwirtschaft erfolgreich eingesetzt werden, wenn geeignete Biokohle dem Grünlandboden in richtigen Mengen zugeführt wird. Die meisten Untersuchungen wurden mit Applikationsmengen von 10 bis 30 t pro Hektar durchgeführt, was jedoch nicht jährlich wiederholt werden muss. Allerdings fehlen diesbezüglich Langzeitversuche im Dauergrünland. Für eine gezielte und effiziente Anwendung von Biokohle müssen sowohl die Eigenschaften der Biokohle (insbesondere C:N-Verhältnis, Nährstoffgehalt) als auch die mineralogischen, physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des zu behandelnden Bodens berücksichtigt werden.

Auf Grund der sich ändernden agrarpolitischen und sozioökonomischen Rahmenbedingungen werden in Zukunft zahlreiche Grünlandflächen vor allem in Ungunstlagen vermutlich nicht mehr bewirtschaftet. Möglicherweise kann die oberirdische pflanzliche Biomasse von nicht mehr bewirtschafteten Grünlandflächen als Ausgangsmaterial für die Biokohle-Herstellung verwendet werden. Aus der Sicht des Naturschutzes und der Landschaftsästhetik ist die Abfuhr von oberirdischer pflanzlicher Biomasse von brachgefallenen Grünlandflächen positiv zu bewerten.

LITERATUR

[1] Buchgraber, K. und G. Gindl: Zeitgemäße Grünlandbewirtschaftung. 2. Auflage, Leopold Stocker Verlag, Graz, 192 S., 2004

[2] Bohner, A.: Grassland soils - properties and functions. Local land & soil news 42/43, 7-9, 2012

[3] Sitaula, B. K., S. Hansen, J. I. B. Sitaula & L. R. Bakken: Effects of soil compaction on N_2O emission in agricultural soil. Chemosphere – Global Change Science 2, 367-371, 2000

[4] Bohner, A., G. Eder & M. Schink: Nährstoffkreislauf und Stoffflüsse in einem Grünland-Ökosystem. 12. Gumpensteiner Lysimetertagung. Bericht HBLFA Raumberg-Gumpenstein, 91-99, 2007

[5] Kloss, S., F. Zehetner, B. Wimmer, J. Buecher, F. Rempt & G. Soja: Biochar application to temperate soils: Effects on soil fertility and crop growth under greenhouse conditions. J. Plant Nutr. Soil Sci. 177, 3-15, 2014

[6] Bohner, A., B. Wimmer, W. Graiss, M. Kandolf, J. Kaufmann, M. Schink & G. Soja, G.: Effects of biochar addition on dry matter production and competitive ability of *Rumex obtusifolius* L. Journal für Kulturpflanzen 68: 232-240, 2016

[7] Schimmelpfennig, S., C. Kammann, G. Moser, L. Grünhage & C. Müller: Changes in macro- and micronutrient contents of grasses and forbs following *Miscanthus x giganteus* feedstock, hydrochar and biochar application to temperate grassland. Grass and Forage Science 70, 582-599, 2015

[8] Wang, T., M. Camps-Arbestain, M. Hedley & P. Bishop: Predicting phosphorus bioavailability from high-ash biochars. Plant Soil 357, 173-187, 2012

[9] Van de Voorde, T. F. J., T. M. Bezemer, J. W. Van Groenigen, S. Jeffery & L. Mommer: Soil biochar amendment in a nature restoration area: effects on plant productivity and community composition. Ecological Applications 24, 1167-1177, 2014

[10] Kammann, C., S. Ratering, C. Eckhard & C. Müller: Biochar and hydrochar effects on greenhouse gas (carbon dioxide, nitrous oxide, and methane) fluxes from soils. J. Environ. Qual. 41, 1052-1066, 2012

[11] Taghizadeh-Toosi, A., T. J. Clough, L. M. Condron, R. R. Sherlock, C. R. Anderson & R. A. Craigie: Biochar incorporation into pasture soil suppresses in situ nitrous oxide emissions from ruminant urine patches. J. Environ. Qual. 40, 468-476, 2011

[12] Atkinson, C. J., J. D. Fitzgerald & N. A. Hipps: Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: A review. Plant Soil 337, 1-18, 2010

[13] Novak, J. M., W. J. Busscher, D. W. Watts, D. A. Laird, M. A. Ahmedna & M. A. S. Niandou: Short-term CO_2 mineralization after additions of biochar and switchgrass to a typic Kandiudult. Geoderma 154, 281-288, 2010

12.3.1.4 BIOKOHLE IN DER BIOLOGISCHEN LANDWIRTSCHAFT

(Thomas Rech[36], Sylvia M. Schindecker)[37]

Seit dem Beitritt zur Europäischen Union 1995 wird in Österreich die biologische Landwirtschaft durch EU-Verordnungen (derzeit gültige VO (EG) Nr. 834/2007 und Nr. 889/2008) geregelt.

Da weder Biochar, noch Pflanzenkohle oder Biokohle auf der Europäischen Positivliste der erlaubten Düngemittel, Bodenverbesserer und Nährstoffe (VO (EG) Nr. 889/2008, Anhang I) gelistet sind, dürfen sie in der biologischen Landwirtschaft in der EU nicht eingesetzt werden.

Die Pflanzenkohle und auch die Aktivkohle werden jedoch im Anhang der VO (EG) Nr. 889/2008 in folgenden Zusammenhängen genannt:

VO EG (Nr.) 889/2008 (EU-Bio-VO), Anhang VIII (Ausschnitte):

ABSCHNITT A–LEBENSMITTELZUSATZSTOFFE

Genehmigung	Code	Bezeichnung	Aufbereitung von Lebensmitteln		Anwendungs-bedingungen
			pflanzlichen Ursprungs	tierischen Ursprungs	
A	E 153	Pflanzen-kohle		X	Geaschter Ziegenkäse Morbier-Käse

[36] BMLFUW, Abteilung II/3, Stubenring 1, 1010 Wien; E-Mail: thomas.rech@bmlfuw.gv.at;
[37] Landwirtschaftskammer Österreich, Schauflergasse 6, 1015 Wien; E-Mail: s.schindecker@lk-oe.at

ABSCHNITT B–VERARBEITUNGSHILFSSTOFFE

Genehmigung	Bezeichnung	Aufbereitung von Lebensmitteln pflanzlichen Ursprungs	Aufbereitung von Lebensmitteln tierischen Ursprungs	Anwendungs-bedingungen
A	Aktivkohle	X		

ANHANG VIIIA
ERZEUGNISSE UND STOFFE, DIE ZUR VERWENDUNG IN ODER ZUR ZUGABE ZU BIOLOGISCHEN ERZEUGNISSEN DES WEINSEKTORS ZUGELASSEN SIND

A	Önologische Holzkohle (Aktivkohle)	X		

Im Zuge der Verhandlungen zu einer neuen EU-Bio-Verordnung wird der Einsatz von Biochar als Düngemittel bzw. Bodenverbesserer diskutiert, derzeit (Stand April 2016). Es ist jedoch noch nicht abzusehen, wie die Diskussionen dazu ausgehen.

Laut dem Ithaka Institute for Carbon Intelligence (ehemals Delinat-Institut) muss bei einem möglichen Einsatz von Biochar in der biologischen Landwirtschaft folgenden Punkten besondere Aufmerksamkeit entgegen gebracht werden:

- Ausgangsmaterialien (u.a. keine toxischen Rückstände von Schwermetallen, Anstrichfarben etc.)
- Pyrolyse (u.a. energieautarker Prozess bei Herstellung von Biochar für die Biolandwirtschaft etc.)
- Charakteristika von Biochar (u.a. Nährstoffgehalt, Kohlenstoffgehalt, Gehalt von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen etc.)
- Anwendung von Biochar (u.a. nur in Verbindung mit Kompost etc.)

Von einer Arbeitsgruppe der BIO AUSTRIA wurde der Antrag auf Zulassung im Bio-Landbau bei der EU-Kommission eingebracht (Status Mai 2016).

LITERATUR

Glaser, B.: Biokohle in Böden: CO2-Senke und Bodenverbesserung. 6. Marktredwitzer Bodenschutztage. Bodenschutz in Europa – Ziele und Umsetzung. ISSN 1439-0175, 2010

Ithaka Institute for Carbon Intelligence – Biochar Science Network: Guidelines for the Production and Use of Biochar in Organic Farming (nicht in Kraft) – Version 2.3, 1 | 2010, S.359–362, www.ithaka-journal.net, ISSN 1663-0521, 2010

Kommission der Europäischen Gemeinschaft: Verordnung (EG) Nr. 889/2008 der Kommission vom 05.09.2008 mit Durchführungsvorschriften zur Verordnung (EG) Nr. 834/2007 des Rates über die ökologische/biologische Produktion und die Kennzeichnung von ökologischen/biologischen Erzeugnissen hinsichtlich der ökologischen/biologischen Produktion, Kennzeichnung und Kontrolle, 2008; Online verfügbar unter: http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:250:0001:0084:DE:PDF.

Verheijen, F. G. A., S. Jeffrey, A. C. Bastos, M. Van der Velde & I. Diafas: Biochar Application to Soils – A Critical Scientific Review of Effects on Soil Properties, Processes and Functions. Luxemburg: Office for the Official Publications of the European Communities, 2010

12.4 BIOKOHLE IN DER FORSTWIRTSCHAFT

(Viktor J. Bruckman[38], in Abstimmung mit Georg Greutter[39])

Die bodenverbessernden Eigenschaften von Biokohle in der Landwirtschaft wurden in der Literatur bereits ausführlich diskutiert. Generell berufen sich Aussagen zu den Konsequenzen der Anwendung von Biokohle auf Studien und Erfahrungen im landwirtschaftlichen Sektor. Nur sehr wenige Beispiele sind aus der Forstwirtschaft bekannt, obwohl hier die Voraussetzungen für einen Einsatz von Biokohle mitunter gut sind. Das betrifft einerseits die Verfügbarkeit von für die Pyrolyse geeigneter Biomasse, andererseits die charakteristischen Eigenschaften typischer Waldböden, wo positive Effekte hinsichtlich Bodenverbesserung potentiell stärker sind als auf landwirtschaftlichen Flächen. Im Gegensatz zu landwirtschaftlich genutzten Kulturpflanzen stocken Waldbestände üblicherweise entweder auf Böden, die aufgrund der Topographie oder der Substratqualität ungeeignet für den Feldbau sind. Die Konsequenz dieses anthropogenen Eingriffes in die Kulturlandschaft über Jahrhunderte ist, dass in der Forstwirtschaft oft auf Grenzertragsböden gearbeitet wird, was einerseits den waldbaulichen Spielraum und andererseits den Zuwachs einschränkt. Im pannonisch geprägten Osten Österreichs sind zudem hohe Temperaturen im Sommer, sowie Trockenperioden aber auch Spätfrost ein potentielles Problem für die Forstwirtschaft. Diese Problematik dürfte insofern auch durch den Klimawandel zukünftig verstärkt werden, da von einer Zunahme der extremen Wetterereignisse ausgegangen wird. Der Sommer 2015 beispielsweise hat durch Trockenheit und Hitze zu einem erhöhten Aufkommen an Schadholz durch Käferbefall geführt. Die Schäden betreffen aber nicht nur Altbestände, insbesondere verursacht extreme Trockenheit auf Aufforstungsflächen zahlreiche Ausfälle.

In vielen Waldökosystemen spielt Kohle eine natürliche Rolle, speziell in mediterranen Klimaregionen mit periodisch auftretenden Waldbränden. In solchen Systemen ist Feuer ein bedeutendes Element und etwa für die Regeneration einiger Arten unerlässlich. Allerdings kommt es bei der Verbrennung anders als bei der Pyrolyse aus unterschiedlichen Gründen zu einem nicht klar definiertem Endprodukt [1]. Nach Waldbränden sind Anteile vorhanden, die nur teilweise pyrolisiert wurden oder mit anderen Elementen reagiert haben. Das führt zu schwer voraussagbaren Eigenschaften und einer oft verminderten Stabilität des Materials. Wenn vollständige Verbrennung vorliegt, sind die mineralischen Komponenten im Endprodukt Asche konzentriert. Diese Komponenten liegen allerdings ebenfalls nicht in beständiger Form vor. Die positiven Eigenschaften von Biokohle beruhen dem gegenüber vor allem mit der zu erwartenden Beständigkeit des Materials. Gezielte Pyrolyse hat den Vorteil, dass die Eigenschaften von Biokohle durch Variation des Ausgangsmaterials und der Pyrolysebedingungen den Anforderungen und den Bodenbedingungen am Einsatzort möglichst gut angepasst werden können. Dadurch kann der gewünschte Effekt effizient (d.h. mit möglichst geringem Material- und Kostenaufwand und ohne unerwünschte Nebenwirkungen) über einen längeren Zeitraum erreicht werden.

Zur potentiellen Anwendung von Biokohle in der Forstwirtschaft gibt es im Verhältnis zur Landwirtschaft noch relativ wenige Ergebnisse. Allerdings zeigt sich bisher, dass Biokohle insbesondere bei der Restaurierung von Waldbeständen auf degradierten oder belasteten Waldböden (z.B. Schwermetalle) und hier insbesondere bei einem beabsichtigten Baumartenwechsel oder bei der Initiierung von Beständen eine bedeutende Rolle spielen kann [2]. Ein wichtiger Faktor neben der Anwendung ist auch die (regionale) Verfügbarkeit von Biomasse für die Herstellung von Biokohle. Im Vergleich zur Landwirtschaft sind die benötigten Mengen im Forstsektor

[38] Austrian Academy of Sciences Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, 1010 Wien; E-Mail: viktor.bruckman@oeaw.ac.at
[39] BMLFUW, Abteilung III/4, Marxergasse 2, 1030 Wien; E-Mail: georg.greutter@bmlfuw.gv.at

üblicherweise lokal ausreichend verfügbar. Zudem eignet sich holzige Biomasse sehr gut für die Herstellung von qualitativ hochwertiger Biokohle mit einem hohen Kohlenstoffgehalt und einer guten Stabilität. Wichtige Eigenschaften wie z.B. Kohlenstoffgehalt, Kationenaustauschkapazität, Konzentrationen von Mineralstoffen, Kohlenstoffsequestrierung und Aschegehalt sind eher durch die verwendete Biomasse beeinflusst als durch die Pyrolysebedingungen [3]. Der Porenanteil ist bedingt durch die Mikrostruktur von holziger Biomasse (Kapillarstrukturen wie z.B. Xylem) und den relativ geringen Ascheanteil höher als bei anderen Arten von Biomasse [4], was in Verbindung mit der heterogenen Größenverteilung der Poren die reaktive Oberfläche vergrößert. Daher kann eine verstärkte Nutzung von Biomasse aus dem Wald für die Herstellung von Biokohle als Chance gesehen werden (aus der Perspektive der Produktion und Produktvermarktung), wodurch Einkommen diversifiziert werden kann. Zudem können bereits kleinere lokale Anlagen überschüssige Energie auskoppeln, die dann anderwärtig verwendet oder verkauft werden kann. Eine verstärkte Biomassenutzung in bestehenden Waldökosystemen muss aber jedenfalls die standörtlichen Grenzen des Nährstoffentzugs beachten. Kompartimente wie z.B. Astmaterial stellen eine potentielle Quelle für die Herstellung von Biokohle dar. Sie sind für traditionelle Nutzung nicht geeignet und verbleiben daher im Idealfall am Standort, wodurch sie die Nährstoffentzüge minimieren. Daher müssen zusätzliche Nutzungen den Kriterien einer nachhaltigen Bewirtschaftung entsprechen.

FLÄCHIGE VERSUS PUNKTUELLE AUSBRINGUNG

Je nach Fragestellung bzw. Zielsetzung kann zwischen flächigem oder punktuellem Einsatz von Biokohle in der Forstwirtschaft unterschieden werden. Während eine Ausbringung auf der Fläche die Bodeneigenschaften auf der gesamten Bestandesfläche beeinflusst, sind punktuelle Applikationen üblicherweise auf die gezielte Behandlung von Einzelbäumen ausgelegt.

Anders als auf landwirtschaftlichen Nutzflächen kann Biokohle auf intakten Waldstandorten nicht ohne erheblichen Aufwand und Risiken flächig mit mechanischen Hilfsmitteln in den Waldboden eingebracht werden (z.B. durch Pflügen). Zudem würden mit der massiven einhergehenden Störung des Bodengefüges Nährstoffe und insbesondere Kohlenstoff aus dem System verloren gehen, was im Sinne der zu erwartenden positiven Kohlenstoffbilanz kontraproduktiv wäre. Damit gelten für die die Ausbringung auf der Fläche ähnliche Grundsätze und Einschränkungen wie für die in einigen Gegenden praktizierte Applikation von Kalziumkarbonat (Kalkung) direkt auf den Waldboden. Dabei können aber nur begrenzte Mengen je Applikation ausgebracht werden. Aus ökonomischen Gründen wird das mit geringem personellem Aufwand mit geeigneten Streuwagen erfolgen, die einerseits die Befahrbarkeit der Flächen und andererseits gewisse physische Eigenschaften speziell hinsichtlich Partikelgrößen und Wassergehalt des Materials voraussetzt. Aktuelle Studien befassen sich u.a. mit der Untersuchung der Stabilität von auf dem Waldboden aufgebrachter Biokohle. Hier hat sich gezeigt hat, dass speziell die ersten beiden Monate nach Ausbringung kritisch hinsichtlich Erosion durch Starkregenereignisse sind. Nach Perioden längerer Trockenheit kann in diesem Zeitraum auch Wind, insbesondere in nicht ebenem Gelände, zu Erosion führen [5]. Die Autoren weisen aber darauf hin, dass die flächig aufgebrachte Biokohle (10t/ha) bereits nach einer Vegetationsperiode kaum mehr am Waldboden sichtbar ist und daher keine Erosionsgefahr mehr besteht. Sie empfehlen, den Behandlungszeitpunkt nicht in Perioden häufiger Starkregenereignisse oder längerer Trockenperioden zu verlegen. Es hat sich gezeigt, dass 10-15t/ha die Obergrenze der bei einer Behandlung auszubringenden Menge darstellt. Bei einer eventuellen Restaurierung von belasteten Standorten, die aufgrund von Kontamination (z.B. Schwermetalle) ungeeignet für Land- und Forstwirtschaft sind, kann Biokohle aufgrund des Fehlens der typischen Humusschicht auch direkt mit geeigneten Equipment in den Boden eingebracht werden. Je nach Art der Kontamination und den belasteten Horizonten wird die Bearbeitungstiefe gewählt. Ziel einer solchen Maßnahme ist

die Immobilisierung von Schadstoffen durch die hohe Adsorptionskapazität von Biokohle. Dabei wird der Schadstoff zwar wie z.B. mit Phytoremediation nicht vom Standort entfernt, aber der Verfügbarkeit in der Bodenlösung unterbunden oder reduziert.

Bei der Neupflanzung einer Kultur kann die gezielte punktuelle Behandlung von Einzelbäumen oder Baumgruppen sinnvoll sein, wobei die oberirdische Behandlung von Einzelindividuen oder kleineren Kollektiven einen Sonderfall darstellt. Aus praktischen Gründen wird die Ausbringung eher manuell erfolgen, ansonsten gelten dieselben Grundsätze wie bei der flächigen Behandlung. Bei punktuellen Behandlungen insbesondere bei Begründung des Bestandes durch Aufforstung kann das Substrat in den Mineralboden des unmittelbaren Wurzelraumes des jeweiligen Einzelbaumes eingearbeitet werden. Eine in der landwirtschaftlichen Kultivierung von z.B. Kautschukbäumen in den tropischen Regionen gängige Praxis ist die Befüllung von kleinen Gräben entlang der Pflanzlinien mit Biokohlesubstrat, wobei hier meist eine Depotdüngung mit behandelter Biokohle (z.B. Kompost oder Mineraldünger, angestrebt wird.

In der Literatur finden sich zwar Hinweise, dass Biokohle auch im Straßenbau in sehr lehmigen Böden zur Steigerung der physischen Belastbarkeit des Unterbaus eingesetzt werden kann [6]. Dies dürfte insbesondere für den Forststraßenbau interessant sein. Allerdings bedarf es hier vor einer kommerziellen Anwendung weiterer Untersuchungen, insbesondere hinsichtlich der längerfristig zu erwartenden Effekte.

POTENTIELLE EINSATZGEBIETE IN DER FORSTWIRTSCHAFT

Die Einsatzgebiete für Biokohle in der Forstwirtschaft können bei geeigneten wirtschaftlichen Rahmenbedingungen vielfältig sein. Je nach Ausgangssituation (Standort, Topographie, Bestandesstruktur und Bestandesalter, Verfügbarkeit von Biomasse etc.) und gewünschtem Ergebnis kann auf unterschiedliche Verfahren zurückgegriffen werden. Im folgenden Teil werden die möglichen Einsatzgebiete kurz thematisiert.

ERHÖHUNG DER PUFFERKAPAZITÄT AUF NÄHRSTOFFVERARMTEN STANDORTEN

Eine Flächenbehandlung kann aus unterschiedlichen Zielsetzungen erfolgen. Zum Beispiel kann auf nährstoffarmen bzw. degradierten Standorten mit verminderter Austauschkapazität die Nährstoffsituation verbessert werden. Zwar werden mit Biokohle dem Standort einige essenzielle Elemente (insbesondere Bestandteile der Asche wie P, Ca, K) zugeführt, je nach Herstellungsverfahren kaum aber N. Dies kann aufgrund der Adsorption zu einem Mangel führen, was, wie in vielen Versuchen nachgewiesen wurde, das Wachstum verringern kann. Bei Durchforstungen und insbesondere nach Endnutzungen, wo besonders hohe Mineralisierungsraten auftreten, könnten auf diesen Standorten allerdings Verluste durch Auswaschung minimiert werden. Zudem kann durch eine Verbesserung der physikalischen Bodeneigenschaften (z.B. Porosität) das Erosionsrisiko vermindert werden. Zu beachten ist hierbei, dass sich die Biokohle zu dem Zeitpunkt möglichst weit im Bodenprofil, idealerweise aber schon in Kontakt mit Mineralboden, befinden soll. Das erfordert einen zeitlichen Versatz zwischen Aufbringung und Erzielen des gewünschten Effektes.

ZUSÄTZLICHE KOHLENSTOFFSPEICHERUNG

Die Ausbringung von Biokohle auf Waldböden kann eine zusätzliche Kohlenstoffspeicherung erzielen. Dabei kann zwischen primärem und sekundärem Sequestrierungseffekt unterschieden werden. Der primäre Effekt ist ein Resultat der Rekalzitranz der Biokohle selbst, also der

Widerstandsfähigkeit der Kohlenstoffverbindungen gegenüber Verwitterung und mikrobiellem Abbau, die aufgrund der Anordnung der Kohlenstoffatome während der Pyrolyse in kondensierte aromatische Verbindungen im Allgemeinen sehr resistent sind. Wird dadurch die Bodenfruchtbarkeit im Bestand verbessert und führt diese zu höherer Nettoprimärproduktion, ist damit der sekundäre Effekt erreicht. Aufgrund von vielseitigen Wechselwirkungen – insbesondere aber dem mit Ausbringung von Biokohle verbundenen veränderten pH-Bedingungen und damit dem Einfluss auf die Bodenfauna –, können verschiedene Folgen hinsichtlich der Kohlenstoffbilanz beobachtet werden. Dabei wird vom „priming effect“ gesprochen, der sowohl positiv (erhöhte Bodenatmung und daher höherer Verlust an Kohlenstoff) als auch negativ (verringerte Bodenaktivität) und nach einer Behandlung mit Biokohle auch zeitlich variabel sein kann. Ein in der Literatur öfters beschriebender typischer Verlauf wurde auch auf einem fichtendominierten Waldstandort in der Nähe von Weitra in Niederösterreich gefunden, wo nach einem anfänglich schwachem positiven Priming im weiteren Verlauf des Versuches kein signifikanter Unterschied mehr auftrat [7]. Unter der Voraussetzung eines geeigneten Monitorings könnte der Effekt auf die Kohlenstoffbilanz relativ genau quantifiziert werden.

KURZUMTRIEB

Der auch in Zukunft erhöhte Bedarf an Biomasse zur energetischen und stofflichen Verwertung kann zu einem Ausbau von Plantagen (Energieholzplantagen) mit kurzen Umtriebszeiten und schnell wachsenden holzigen Arten führen. Dadurch werden aufgrund häufigerer Erntezyklen in Verbindung mit der Ernte von Kompartimenten mit hohen Nährstoffgehalten im Vergleich zum Stammholz, wie Rinde und dünne Zweige [8], insgesamt mehr Nährstoffe entzogen. In der Regel wird dadurch Düngung notwendig und Biokohle kann hier als Depotdünger eingesetzt werden (nach vorheriger Anreicherung mit geeignetem Düngemittel, Siehe Teil 2/B und C). Dadurch kann der Düngemitteleinsatz reduziert und insgesamt die Effizienz gesteigert werden. Biokohle kann damit als Alternative zu wiederholter Düngung oder als Ersatz zu Produkten mit chemischen Mechanismen zur zeitlich verzögerten Abgabe der Nährstoffe verwendet werden. Damit kann auch eine verringerte Belastung des Grundwassers durch Auswaschung erreicht werden. Darüber hinaus hat Biokohle einen positiven Effekt auf die Emissionen von Treibhausgasen, insbesondere Lachgas von stickstoffgedüngten Böden [9].

BESTANDESVERJÜNGUNG

Zur Bestandesverjüngung muss in vielen Fällen auf Pflanzmaterial zurückgegriffen werden, wenn Naturverjüngung nicht erfolgreich ist bzw. wenn eine bestimmte Baumartenzusammensetzung im Betriebsziel angestrebt wird. Neben den relativ hohen Kosten für die Pflanzung sind auch mitunter aufwendige Nacharbeiten notwendig um die Bestände zu etablieren. Biokohle oder geeignete Substrate auf Biokohle-Basis können dabei helfen, durch ihre Depotdüngefunktion und ihr Wasserhaltevermögen den Anwuchserfolg zu maximieren. Phasen längerer Trockenheit, wie zum Beispiel im Sommer 2015, können insbesondere bei jungen Forstkulturen zu erheblichen Ausfällen führen. Wie eingangs erwähnt, könnten Extremereignisse als Folge des Klimawandels in Zukunft öfter auftreten. Ein kürzlich in Deutschland durchgeführter Versuch hat gezeigt, dass Pflanzungen mit Biokohle-Substrat bei Buchen zu deutlich höherer Vitalität führten, der Zuwachs bei Fichte dagegen tendenziell geringer ausgefallen ist [10]. Beide Baumarten erhöhten aber ihre höhere Frostresistenz.

RESTAURIERUNG

Kontaminierte und/oder degradierte Standorte können mit Biokohle wieder restauriert werden. Mit Schadstoffen, wie z.B. Schwermetallen, kontaminierte Standorte lassen sich nur sehr schwer wieder

für die landwirtschaftliche Produktion nutzen. Daher sind solche Flächen prioritär für die Forstwirtschaft zu verwenden, wo je nach Nutzung und Endprodukt höhere Grenzwerte gelten können. Bei Kontaminationen, die einen negativen Effekt auf das Pflanzenwachstum haben, kann Biokohle wie schon erwähnt helfen, die Pflanzenverfügbarkeit zu verringern. Dabei werden die Schadstoffe für die Dauer der Beständigkeit im Boden stabilisiert. Degradierte Standorte könnten mit der Beimengung von Biokohle wieder eine Basis für eine Bestandesentwicklung und den folgenden Humusaufbau bekommen.

QUELLSCHUTZ

In Standorten mit besonderen Funktionen (z.B. Quellschutzwälder) könnte Biokohle als Schutz für Trinkwasserquellen eingesetzt werden, wenn eine Kontamination ausgeschlossen werden kann. Zwar unterliegen Quellschutzwälder sehr strengen Vorschriften bezüglich Bewirtschaftung, um jegliche Verunreinigungen zu verhindern. Kleinräumige Störungen (z.B. Windwurf, Käferbefall etc.) können allerdings zu einer plötzlichen Umsetzung von organischem Material führen und insbesondere Nitrate in das Grundwasser freisetzen. Biokohle könnte helfen, diese negativen Effekte zu minimieren. Allerdings fehlen hier noch Daten, die einen möglichen sicheren Einsatz diesbezüglich erlauben würden.

POTENTIELLE RISIKEN

Risiken des Biokohle-Einsatzes in der Forstwirtschaft sind insbesondere mit nicht standortsangepassten Handlungen in Verbindung zu bringen. Daher ist es unabdingbar, vor jeder geplanten Behandlung die Charakteristika des zu behandelnden Bodens zu erfassen um negative Konsequenzen zu verhindern. Zudem muss besonders in kritischen Fällen (Quellschutzwald) auf die Kontamination geachtet werden. In Bezug auf den Kohlenstoffkreislauf besteht das Risiko einer ausgeprägten positiven Primingreaktion, die u.U. sogar zu einem Verlust von Kohlenstoff führen kann. Zudem ist die Rekalzitranz bei unterschiedlichen Bedingungen noch nicht restlos geklärt und es besteht das Risiko eines Verlustes des Kohlenstoffes beim (mikrobiellen) Abbau.

In der Forstwirtschaft werden relativ geringe Deckungsbeiträge (Profite) je Flächeneinheit erzielt. Daher sind flächige Behandlungen zumindest zum derzeitigen Stand aus ökonomischer Sicht zu hinterfragen. Die zuvor angenommenen positiven Effekte auf den Zuwachs könnten sich als nicht rentabel erweisen. In dem Zusammenhang muss auch der Markt für Biomasse als Rohstoff für die Pyrolyse beobachtet werden. Die zunehmende energetische oder stoffliche Verwertung vormals wenig beachteter Sortimente kann die Versorgung von geeigneter Biomasse problematisch machen, weil die Preise eine kostendeckende Pyrolyse nicht mehr erlauben.

Insbesondere bei der flächigen Ausbringung von Biokohle auf den Waldboden besteht zusätzlich ein erhebliches Gesundheitsrisiko, wenn feine Partikel eingeatmet werden, daher ist auf angemessene Schutzausrüstung bzw. den Wassergehalt zu achten. Besonders problematisch ist die erste Zeit unmittelbar nach der Ausbringung, speziell nach Trockenheit. Wie an einem Beispiel gezeigt werden konnte, erhöhte sich die Staubbelastung einige Tage nach der Ausbringung infolge der Austrocknung [5].

Aufgrund der sehr lückenhaften Forschung von Biokohle-Applikation in Waldökosystemen sind viele Fragen ungeklärt. So wurde beispielsweise in Biomasse von Rotstängelastmoos (*Pleurozium Schreberi*), einem bekanntem Bioindikator, signifikant höhere P-Konzentrationen bereits ein Jahr nach der Biokohle-Applikation gefunden [5]. Dabei ist allerdings nicht klar, in wie fern die sehr starke Bildung von Myzel hier eine Rolle gespielt hat. Speziell Mykorrhizapilze sind bei der Ernährung des Bestandes wichtig. Unklar ist noch, ob ein Einsatz von Biokohle einen Einfluss auf

die Besiedelung und/oder die Artenzusammensetzung von Mykorrhizapilzen hat. Daher ist mehr Forschung in diesem Bereich notwendig um die Risiken für eine Anwendung für die Forstwirtschaft zu minimieren.

LITERATUR

[1] Spokas, K. A.: Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. *Carbon Management,* 1**,** 289-303, 2010

[2] Thomas, S. & N. Gale: Biochar and forest restoration: a review and meta-analysis of tree growth responses. *New Forests***,** 1-16, 2015

[3] Zhao, L., X. Cao, O. Mašek & A. Zimmerman: Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of Hazardous Materials,* 256–257**,** 1-9, 2013

[4] Ronsse, F., S. van Hecke, D. Dickinson & W. Prins: Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy,* 5**,** 104-115, 2013

[5] Bruckman, V. J., M. Milenkowic & M. Klinglmüller: Biochar for Climate Change Mitigation: The FOREBIOM Experience. *In:* Bruckman, V. J., J. Liu, B. B. Uzun Akinlar & E. A. Varol (eds.) *Biochar: A regional Supply Chain Approach in View of Climate Change Mitigation [in review]*. Cambridge University Press, 2015

[6] Hseu, Z.-Y., S.-H. Jien, W.-H. Chien & R.-C. Liou: Impacts of Biochar on Physical Properties and Erosion Potential of a Mudstone Slopeland Soil. *The Scientific World Journal,* 2014**,** 602197, 2014

[7] Bruckman, V. J., T. Terada, B. B. Uzun, E. Apaydın-Varol & J. Liu: Biochar for Climate Change Mitigation: Tracing the in-situ Priming Effect on a Forest Site. *Energy Procedia,* 76**,** 381-387, 2015

[8] Bruckman, V. J.: Considerations for Sustainable Biomass Production in Quercus-Dominated Forest Ecosystems. *In:* MATOVIC, M. D. (ed.) *Biomass Now - Cultivation and Utilization.* Rijeka: InTech, 2013

[9] Cayuela, M. L., L. van Zwieten, L., B. P. Singh, S. Jeffery, A. Roig & M. A. Sánchez-Monedero: Biochar's role in mitigating soil nitrous oxide emissions: A review and meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment,* 191**,** 5-16, 2014

[10] Weinfurter, K. & D. Drabkin: Regionalprojekt 3: Waldmanagement im Hochsauerlandkreis. *Biochar goes practice.* Berlin, 2014

12.5 BIOCHAR-ANWENDUNGEN AUSSERHALB DER LAND-UND FORSTWIRTSCHAFT

(Benjamin Hupfauf, Marcel Huber)[40]

RECHERCHE BIOKOHLE

Der Begriff Biokohle schließt eine Vielzahl von Kohlen mit ein. International wird hauptsächlich der Begriff Holzkohle oder auch charcoal als synonym für Biokohlen verwendet. Ebenfalls weit verbreitet sind die Begriffe Pflanzenkohle oder auch Aktivkohle, die in den meisten Fällen aus biogenen Materialen hergestellt sind. In diesem Bericht werden alle unterschiedlichen Begrifflichkeiten als Biokohle zusammengefast und dargestellt.

PRODUKTION

Laut Auskunft von European Biochar wurden 2014 in Europa etwa 10.000 t Biokohle produziert. Jedoch sind dabei Biokohlen gemeint, die nach dem European biochar certifcate hergestellt worden sind.

International gesehen wurden 2005 weltweit mehr als 44 Millionen Tonnen Biokohle hergestellt. Die derzeitige Ausbeute liegt in etwa bei 20 % (w/w) der frischen Biomasse. Dementsprechend wird von einem Inputmaterial über 220 Millionen Tonnen Biomasse ausgegangen [1]. Abbildung 1 zeigt die Länder, in denen Biokohle produziert wird. Je dunkler das Land, desto größer die Produktion.

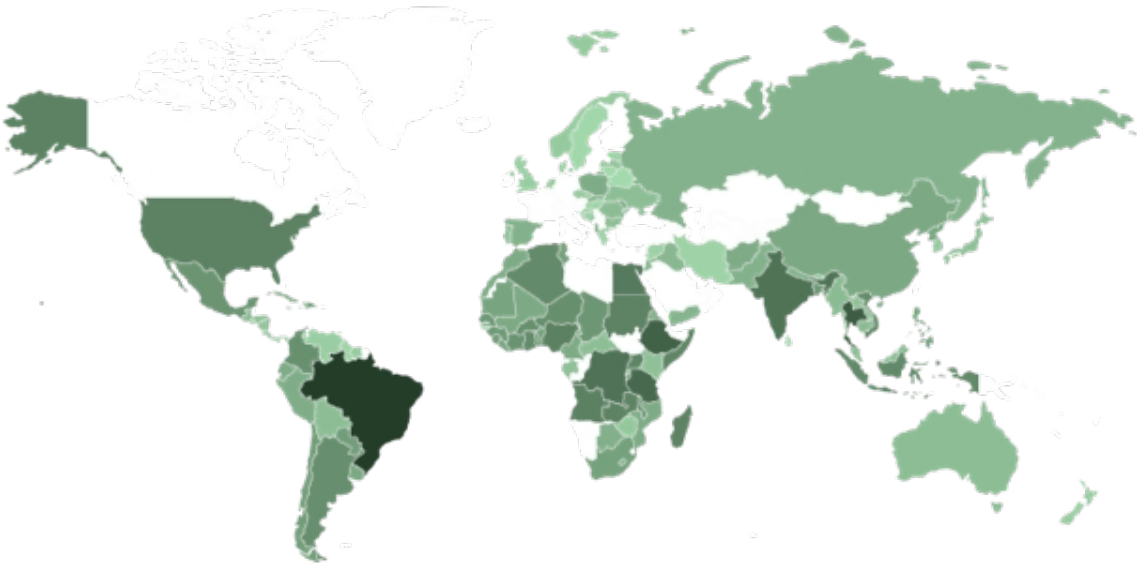

Abbildung 7: Biokohle Produktionsstätten, Quelle: [2]

Unter den gößten zehn Produktionsländern befindet sich kein Europäisches Land, siehe Tabelle 1. Erst auf Platz 53 liegt mit Polen (Produktionsmenge 2005: 90.000 Tonnen) das erste europäische Land [2]. Abbildung 7 zeigt die Anteile der Länder an der gesamten Biokohle Produktion.

[40] MCI MANAGEMENT CENTER INNSBRUCK, Maximilianstrasse 2, 6020 Innsbruck/Österreich, E-Mail: benjamin.hupfauf@mci.edu; marcel.huber@mci.edu

TABELLE 1: DIE 10 GRÖSSTEN BIOKOHLE-PRODUKTIONSLÄNDER 2005 (EINSCHLIESSLICH HOLZKOHLE) [2]

Platz	Land	Produktionsmenge / (t/a)
1	Brasilien	9.890.00
2	Thailand	3.920.00
3	Äthiopien	3.220.000
4	Tansania	2.510.000
5	Indien	1.730.000
6	Demokratische Republik Kongo	1.700.000
7	Ägypten	1.280.000
8	Angola	982.000
9	Nigeria	976.000
10	USA	940.000

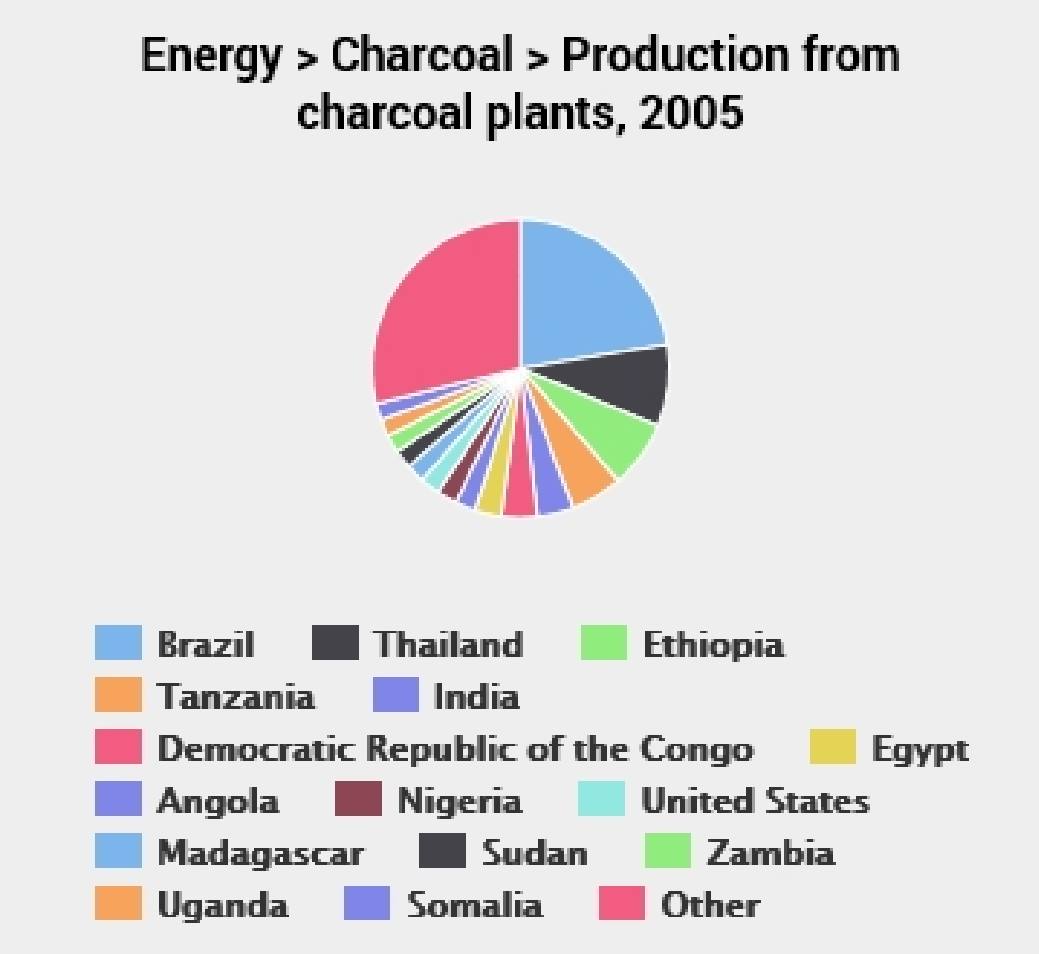

Abbildung 8: Anteile der Länder an der gesamten Biokohle Produktion (einschließlich Holzkohle), Quelle: [2]

Viele Produktionsstätten generieren massive Luftemissionen. Deshalb können diese Technologien in höher entwickelten Ländern nicht eingesetzt werden, da sie weit oberhalb der gesetzlichen

Emissionsgrenzen liegen [1]. Im Jahr 2009 wurden 47 Millionen Tonnen Biokohle produziert [3]. Afrika gilt dabei mit ca. 63 % als Hauptproduzent. Von 2004 zu 2009 erhielt die Biokohleproduktion in Afrika einen Zuwachs von ca. 30 %. Südamerika hingegen verzeichnete seit 2004 einen Rückgang von ca. 30 %. Asien und Lateinamerika haben 2009 jeweils in etwa 7,4 Millionen Tonnen Biokohle produziert.

TABELLE 2: BIOKOHLEPRODUKTION UNTERTEILT IN REGIONEN [3]

	Produktion 2009 / Mio. Tonnen	Marktanteil		Verschiebung des Marktes	
		2004	2009	2004 – 2009	2008 – 2009
Afrika	29,4	52	63	29,8	5,9
Asien	7,4	16	16	10,2	-1,4
Europa	0,5	1	1	5,4	-1,4
Lateinamerika und Karibik	8,8	29	19	-29,3	-27,4
Nordamerika	0,9	2	2	-0,7	0,8
Ozeanien	0,0	0	2	4,1	1,8
Weltweit	47	100	100	8,9	-3,6

Im Vergleich zur globalen Biokohleproduktion (Tabelle 2) ist dessen Anteil in Europa, Nordamerika und Ozeanien unbedeutend [3]. Abbildung 3 zeigt den Anteil der Länder an der weltweiten Biokohleproduktion und im Vergleich dazu die Entwicklung der Biokohleproduktion in Bezug auf die Regionen.

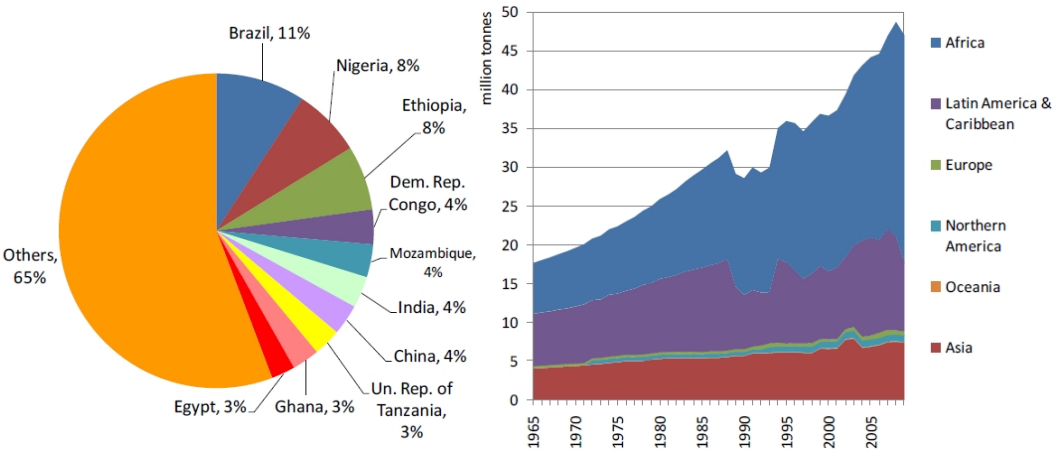

Abbildung 9: Biokohle Produzenten (linkes Bild), Entwicklung der Biokohleproduktion (rechtes Bild), Quelle: [3]

Abbildung 9 zeigt die größten Export- bzw. Importeure von Biokohle.

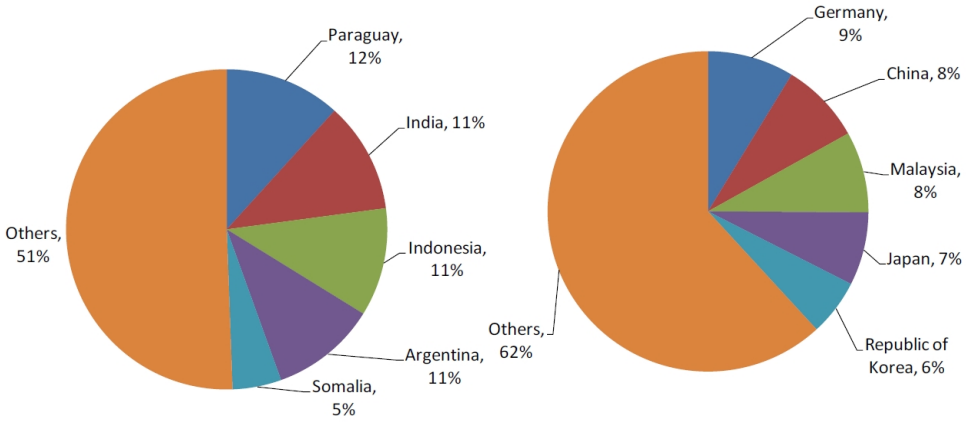

Abbildung 10: Zehn größte Biokohle Exportländer (linkes Bild), zehn größte Biokohle Importländer (rechtes Bild), Quelle: [3]

ANWENDUNG

Brasilien gilt als größter Biokohleproduzent. Derzeit wurde nur angegeben, dass die Kohle zur Herstellung von Roheisen verwendet wird. Darüber hinaus verwendet man industriell produzierte Biokohle oft für chemische Zwecke, zum Grillen oder für die Stahlproduktion. In Entwicklungsländern wird Biokohle hauptsächlich immer noch zum Kochen und Grillen eingesetzt. Für die Kohleproduktion dienen meist ineffiziente Erdmeiler [3]. In den entwickelten Ländern steigt der Bedarf an Grillkohle. Auch für die Produktion von Kupfer, Zink und anderen wertvollen Metallen werden große Mengen an Biokohle benötigt. In der Metallproduktion sind der Aschegehalt, Partikelgröße und Quetschfestigkeit entscheidende Kriterien. Der Anteil an fixiertem Kohlenstoff ist eine wichtige Qualitätseigenschaft von Biokohle. Je nach Verwendungszweck werden unterschiedliche Anteile an fixiertem Kohlenstoff gefordert. Beispielsweise muss Grillholzkohle nach DIN 51 749 über 89 % an fixiertem Kohlenstoff bezogen auf die wasserfreie Biokohle aufweisen [4]. In anderen Worten: der fixierte Kohlenstoffgehalt ist sehr wichtig [5]. Hingegen sind im Grillbereich die Teerrückstände bzw. der Anteil an flüchtigen Inhaltsstoffen entscheidend.

TABELLE 3: KOHLEANWENDUNG [6]

Chemische Industrie	Eisen und Stahl	Metallurgie	Aktivierte Kohle	Kraftstoff	Sonstige
Kohlenstoffdisulfid, Herstellung Cellulosefasern	Eisenschmelze	Gießereien	Wasseraufbereitung	Gas für Kraftfahrzeuge	Kohlensäurehaltige Getränke
Natriumcyanid, Gewinnung Metalle, Galvanotechnik	Hochreines Eisen	Kupferschmelze	Gasreinigung	Gas für Stationäre Motoren	Futtermittelzusätze
Metallartige Karbide, Wolframkarbide	Sintern, Reduktion von Erz	Zinnschmelze	Lösemittelrückgewinnung		Bodenzusatzstoff
Siliziumkarbide, Schleifmittel, Feuerfeststoffe, Halbleitermaterial	Silizium Herstellung	Schmelzen und Gießen von Spez. Metallen	Destillationskolonen		Tabak Aushärtung
		Elektroofen Elektroden	Katalysatoren		Obsttrocknung
			Pharmaindustrie		Kunst und Druckindustrie
			Lebensmittelindustrie Alterung von Spirituosen Softdrinks Weinherstellung		Feuerwerk
			Elektrische Batterien		Schwarzpulver Sprengstoff
			Zigarettenfilter		

GRILLKOHLE IN ÖSTERREICH

Über 80 % der in Österreich genutzten Biokohle wird aus den Ländern Bosnien-Herzegowina, Serbien und Deutschland importiert. Deutschland spielt dabei nur eine verhältnismäßig untergeordnete Rolle, siehe Tabelle 4. Die österreichischen Lagerhäuser beziehen Biokohle von der Austria Franchise System GmbH, diese wiederum kauft die Biokohle von der Firma Colpack aus Bosnien und Profagus aus Deutschland [7].

TABELLE 4: GRILLKOHLE IMPORT ÖSTERREICH 2009 [7]

Importland	Wert / €
Bosnien-Herzegowina	2.084.000
Serbien	2.017.000
Deutschland	732.000
Frankreich	334.000
Spanien	247.000
Ukraine	231.000

EISENERZSINTER

Biokohle kann zur Produktion von Eisenerzsinter verwendet werden. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass reiner Koks bei der Herstellung von Eisenerzsinter durch ein Gemisch aus Biokohle und Koks ersetzt werden kann. Unter normalen Sinter Bedingungen kann eine Mischung des Energieeintrags aus 50 % Biokohle und 50 % Koks zu einem ähnlichen Produkt führen. Bei Tests wurde der Energieeintrag durch 0, 10, 25, 50 und 100 % Biokohle ersetzt. Bei diesen Versuchen konnte eine Steigerung der Staub-, Methan- und Kohlenwasserstoffemissionen beobachtet werden. Im Gegensatz dazu sanken die Emissionen an polychlorinierten Dibenzodioxinen/Furanen um 50 % im Vergleich zum Referenzprozess mit 100 % Koks [8].

AUSSAGEN VON VOEST ALPINE ZUM EINSATZ VON KOHLE AUS BIOMASSE

Voest Alpine kauft im Jahr ca. 1,8 Mio. Tonnen Kokskohle und produziert ca. 1,4 Mio. Tonnen Koks. Derzeit verwendet sie keine Kohle aus Biomasse. Diese wird erst interessant, wenn sie preislich konkurrenzfähig mit Kokskohle ist und auch andere Vorteile bietet (z.B. höhere Ausbringung, Vorteil für die Koksqualität, positiver Umwelteinfluss).

In den Jahren 2006-2008 wurden Tests mit Holzmehl durchgeführt. Diese hatten den Vorteil niedrigen Asche- und Schwefelgehalts, allerdings sank die Koksqualität aufgrund der niedrigeren Ausbringung.

KOKSKOHLEPREISE

Eine Tonne kostet zurzeit rund 215 Dollar zuzüglich 8,50 Dollar pro Tonne für die Seefracht (entspricht ca. 210 € inkl. Fracht je nach Wechselkurs). 2012 wurde für die kommenden Jahre ein vermutlich stetig steigender Preis prognostiziert [9]. Derzeit beträgt der Preis ca. 540 €/t [10]

AKTIVKOHLE

Aktuellen Abschätzungen zufolge steigt der Bedarf an Aktivkohle jährlich um 8,1 %. Demnach würden im Jahr 2018 weltweit 2,1 Millionen Tonnen Aktivkohle gebraucht [11]. Rückgerechnet entspricht dies im Jahr

2005 einer jährlichen Produktion von 0,7 Millionen Tonnen, was wiederum einen Anteil von 1,5 % der gesamten Biokohleproduktion bedeutet.

TABELLE 5: ROHSTOFFE AKTIVKOHLE, QUELLE: [12]

Kohle	Etablierte Biomasse	Rohstoffnische
Xylit (Schieferkohle)	Kokosnussschalen	Torf
Fettkohle (Steinkohle)	Hartholz	Olivenkerne
Glanzbraunkohle (Pechkohle)	Weichholz	Frucht bzw. Nussschalen
Anthrazit	Bambus	Palmenschalen
		Makadamianussschalen
		Pekanussschalen

Aktivkohle für die Wasseraufbereitung wird meist aus Kokosnussschalen oder Kohle hergestellt [12]. Weitere Ausgangsstoffe der Aktivkohle können aus Tabelle 6 entnommen werden.

Studie zum weltweiten Aktivkohle Markt: Kosten → 6.400 €, verfügbar unter
http://www.freedoniagroup.com/DocumentDetails.aspx?ReferrerId=FG-01&studyid=3172

LEBENSMITTELZUSATZSTOFF

In der Lebensmittelindustrie findet man Pflanzenkohle/Biokohle unter der Bezeichnung E153. Die Bezeichnungen für Pflanzenkohle in anderen Ländern sind in Tabelle 7 gelistet. Für den Einsatz von Pflanzenkohle in Lebensmitteln gibt es keine Höchstmenge. Lebensmittel dürfen nicht mit Kohle angereichert werden, wenn diese als unbehandelt angeboten werden oder der Gesetzgeber die Anwendung von Zusatzstoffen verbietet. Pflanzenkohle kann außerdem als Arzneimittel, Lebensmittelfarbe, medizinische Kohle oder Kosmetika eingesetzt werden. In der Lebensmittelindustrie findet man Pflanzenkohle unter anderem in Käseumhüllungen, Dragees und Morbier-Käse [13].

TABELLE 6: VERWENDUNGSBEDINGUNGEN VON E153 NACH LEBENSMITTELKATEGORIE DER EU, MODIFIZIERT NACH [14]

Lebensmittelkategorien	Unterkategorie	Beschränkung/Ausnahmen
Käse und Käseprodukte	Gereifter Käse	nur Morbier
Fisch und Fischereiprodukte	Fisch und Fischereiprodukte, einschließlich Weich- und Krebstieren, verarbeitet	nur Fisch- oder Krebstierpaste
		nur vorgekochte Krebstiere
		nur Räucherfisch

Wird E153 bis zu einem maximalen Anteil von 5 % in Bio-Austria Produkte zugemischt, so kann das Produkt immer noch das BIO Austria Siegel tragen [15].

TABELLE 7: ÜBERSETZUNGEN E153 PFLANZENKOHLE [16]

Land	Name	Land	Name
CZ	Medicinální uhlí	FIN	Kasviperäinen lääkehiili
DK	Carbo medicinalis vegetabilis	GB	Vegetable carbon
E	Carbón vegetal	GR	Φυτικός άνθρακας
EST	Taimne süsi	H	Növényi szén
F	Chabon végétal médicinal	I	Carbone vegetale
S	Carbo medicinalis (vegetabiliskt)	LT	Anglies juodasis
TR	Bitkisel karbon	LV	Augogle
P	Carvão vegetal	N	Vegetabilsk karbon
NL	Carbo medicinalis vegetabilis		

Nach telefonischer Auskunft von Carbon Terra (http://www.carbon-terra.eu/de) muss der Kohlenstoffanteil über 95 % liegen.

Das Lebensmittelamt Österreich gab telefonisch an, dass es keine Positiv-Liste für Ausgangsmaterialien gäbe. Es seien aber ca. 230 Stoffe zugelassen.

TABELLE 8: E153 PFLANZENKOHLE MODIFIZIERT NACH [17]

Synonyme	Kohlenschwarz
Definition	Pflanzenkohle (Aktivkohle) entsteht beim unvollständigen Verbrennen (Verkohlen) von pflanzlichen Materialien wie Holz, Zelluloserückständen, Torf, Kokosnuss- und anderen Schalen. Die so gewonnene Aktivkohle wird gemahlen und das entstandene aktivierte Kohlepulver im Zyklon-Abscheider behandelt. Der abgeschiedene Feinstaub wird durch Spülen mit Salzsäure gereinigt, neutralisiert und getrocknet. Das so entstandene Produkt ist herkömmlich als Kohlenschwarz bekannt. Die Färbekraft kann weiter erhöht werden, indem der Feinstaub noch einmal verwirbelt oder noch feiner gemahlen, danach mit Säure gereinigt, neutralisiert und getrocknet wird. Das Endprodukt besteht aus säuberlich getrennten Kohleteilchen. Es kann noch geringe Mengen an Stickstoff, Wasserstoff und Sauerstoff enthalten. Nach der Herstellung kann das Produkt etwas Feuchtigkeit absorbieren.
CI-Nr.	77266
Einecs	231-153-3
Chemische Bezeichnung	Kohlenstoff
Chemische Formel	C
Atommasse	12,01
Gehalt	mindestens 95 % Kohlenstoff (in wasser- und aschefreier Form)
Trocknungsverlust	höchstens 12 % (120 °C, 4 Stunden)

Synonyme	Kohlenschwarz
Beschreibung	schwarzes geruchloses Pulver
Merkmale	
Löslichkeit	unlöslich in Wasser und organischen Lösungsmitteln
Verbrennen	Zur Rotglut erhitzt, verbrennt Pflanzenkohle langsam und ohne Flamme.
Reinheit	
Asche (insgesamt)	höchstens 4,0 % (Zündtemperatur: 625 °C)
Arsen	höchstens 3 mg/kg
Blei	höchstens 2 mg/kg
Quecksilber	höchstens 1 mg/kg
Cadmium	höchstens 1 mg/kg
Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe	Benzo(a)pyren höchstens 50 µg/kg in dem aus 1 g des Produktes durch kontinuierliche Extraktion mit 10 g reinem Cyclohexan gewonnenen Extrakt.
Alkalilösliche Anteile	Das Filtrat, das man nach Sieden von 2 g der Probe mit 20 ml 1 n Natronlauge und Filtern erhält, soll farblos sein.

FUTTERMITTELZUSATZSTOFF

Verwendung und Inverkehrbringen von Futtermittelzusatzstoffen sind EU-weit durch die Verordnung (EG) Nr. 1831/2003 des Europäischen Parlaments und des Rates über Zusatzstoffe zur Verwendung in der Tierernährung geregelt [18].

Der Einsatz von Biokohle als Fütterungskomponente setzt strenge Qualitätsparameter entsprechend des Lebensmittelrechts nach Verordnung (EG) Nr. 178/2002 und den Vorschriften der Futtermittelhygiene gemäß Verordnung (EG) Nr. 834/2007 voraus. Insbesondere die Gehalte an Schwermetallen, Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen spielen als limitierende Faktoren eine besondere Rolle, wobei die nach dem European Biochar Certificate hergestellten Biokohlen sämtliche Grenzwerte für die Fütterung erfüllen [19].

Nach telefonischer Auskunft von Carbon Terra (http://www.carbon-terra.eu/de) darf für die Futtermittel Produktion hauptsächlich Holz von guter Qualität als Rohstoff verwendet werden. Biokohle wird aber auch aus Klärschlamm und Gärresten hergestellt.

GÄRZUSATZSTOFF

Biokohle kann als Additiv in der Biogasproduktion eingesetzt werden. Ihr Einsatz führt zu einer höheren Gasausbeute. Die beste Ausbeute wird beim Einsatz von etwa 2,5 % (w/w) erzielt. Mehrerträge durch den anaeroben Abbau der Biokohle können weitestgehend ausgeschlossen werden. Die Biokohle bietet den Mikroorganismen eine Umgebung, welche sie vor Scherkräften schützt. Der Mehrertrag könnte auch darauf zurückgeführt werden, dass die Biokohle Hemmstoffe aufnimmt und somit eine Hemmung verhindert. Es ist jedoch noch nicht geklärt, ob sich der positive Effekt bei der Gärung ebenfalls feststellen lässt, wenn die Biokohle bereits als Futterzusatzmittel eingesetzt wird [20].

NORMEN UND RECHTSVORSCHRIFTEN

TABELLE 9: NORMEN UND RECHTSVORSCHRIFTEN

Titel	Norm
Feste Biobrennstoffe - Terminologie, Definitionen und Beschreibungen (ISO 16559:2014)	OENORM EN ISO 16559:2014-10-15
Biogene Festbrennstoffe - Brennstoffspezifikationen und -klassen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen (ISO 17225-1:2014)	OENORM EN ISO 17225-1:2014-09-01
Geräte, feste Brennstoffe und Anzündhilfen zum Grillen – Teil 1: Grillgeräte für feste Brennstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren	OENORM EN 1860-1:2013-04-15
Geräte, feste Brennstoffe und Anzündhilfen zum Grillen – Teil 2: Grill-Holzkohle und Grill-Holzkohlebriketts – Anforderungen und Prüfverfahren; Deutsche Fassung EN 1860-2:2005	DIN EN 1860-2:2005
Geräte, feste Brennstoffe und Anzündhilfen zum Grillen – Teil 3: Anzündhilfen für Grill-Holzkohle und Grillkohlebriketts – Anforderungen und Prüfverfahren (konsolidierte Fassung)	OENORM EN 1860-3:2006-04-01
Geräte, feste Brennstoffe und Anzündhilfen zum Grillen – Teil 4: Grillgeräte für Einmalanwendung (Einweggrills) bei der Verwendung fester Brennstoffe – Anforderungen und Prüfverfahren	OENORM EN 1860-4:2005-03-01
Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Granulierte Aktivkohle – Teil 1: Frische granulierte Aktivkohle; Deutsche Fassung EN 12915-1:2009	DIN EN 12915-1:2009-07
Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Granulierte Aktivkohle – Teil 2: Reaktivierte granulierte Aktivkohle; Deutsche Fassung EN 12915-2:2009	DIN EN 12915-2:2009-07
Produkte zur Aufbereitung von Wasser für den menschlichen Gebrauch – Pulver-Aktivkohle; Deutsche Fassung EN 12903:2009	DIN EN 12903:2009-07
Produkte zur Aufbereitung von Schwimm- und Badebeckenwasser – Pulver-Aktivkohle	ÖNORM EN 15799: 2010 06 01
Feste Sekundärbrennstoffe – Verfahren zur Bestimmung des Gehaltes an Biomasse (konsolidierte Fassung	OENORM EN 15440:2011-12-15
Lebensmittelhygiene – Leitungsunabhängige Haushaltswasserfilter – Haushaltswasserfilter auf der Basis von Kationenaustauschern und Aktivkohle	DIN 10521:2009-02

Titel	Norm
Futtermittelzusatzstoff	EU: für Zierfische [21] Schweiz: gemahlene Aktiv-Holzkohle aus unbehandeltem und spez. für die Anwendung ausgewähltem Holz [22]
Lebensmittelzusatzstoff	EU Verordnung 231/2012

TABELLE 10: ANWENDUNGSBEREICH BIOKOHLE [23]

Anwendungsgebiet	Anwendung
Kaskadennutzung in der Viehhaltung	Silagehilfsmittel
	Futterzusatz
	Einstreu
	Güllebehandlung
	Mistkompostierung
	Wasserbehandlung für Fischzucht
Einsatz als Bodenhilfsstoff	Carbon Dünger
	Kompost
	Torfersatz für Aufzuchterden
	Pflanzenschutzmittel
	Ausgleichsdüngung für Spurenelemente
Gebäudekonstruktion	Dämmstoffe
	Luftdekontamination
	Bodenfundamentdekontamination
	Luftfeuchtigkeitsregulation
	Schutz vor Elektrosmog
Dekontaminierung	Bodenzusatz zur Sanierung belasteter Böden
	Bodensubstrat
	Pestizid Oberflächenabfluss-Mauer
	Teich- und Seewasserbehandlung
Biogasproduktion	Biomassezusatz
	Biogas-Gülle-Behandlung
Abwasserbehandlung	Aktivkohlefilter
	Vorschwemm-Zusatz
	Bio-Beet Bodensubstrat
	Komposttoiletten
Trinkwasserbehandlung	Mikrofilter
	Großfilter in Entwicklungsländer
Abgasfilter	Emissionskontrolle
	Raumluftfilter
	Industriematerial (Kohlefaser, Kunststoff)
	Elektronik (Halbleiter, Batterien)
	Metallurgie (Metallreduktion)
	Kosmetik (Seife, Hautcreme, therapeutischer Badezusatz)
	Farbstoffe (Lebensmittelfarbstoff, Industriefarben)
	Energieproduktion (Pellets, Braunkohlezusatz)
	Arzneimittel (Entgiftung, Trägermittel für Wirkstoffe)
Textilindustrie	Gewebezusatz für Funktionswäsche
	Wärmeisolation für Funktionskleidung
	Deodorant für Schuhsohlen
Lebensmittelindustrie	Konservierung von Lebensmitteln
Wellness	Füllstoff für Matratzen
	Füllstoff für Kopfkissen
	Abschirmung elektromagnetischer Strahlung

LITERATUR

[1] Garcia-Perez, M., T. Lewis & C. E. Kruger: Methods for Producing Biochar and Advanced Biofuels in Washington State. Part 1: Literaure Review of Pyolysis Reactors. First Project Report. Hg. v. Washington Stae University. Department of Bioogical Systems Engineering and the Center for Sustaining Agriculture and Natual Resources. WA, 2010

[2] Nation Master: Production from charcoal plants: Countries Comared. Hg. v. Nation Master. http://www.nationmaster.com/country-info/stats/Energy/Charcoal/Production-from-charcoal-plants, 2015, 2015.10.14,

[3] Steierer, F.: Highlights on wood charcoal: 2004-2009. Data source: FAOSTAT-ForesSTAT. http://faostat.fao.org/Portals/_faostat/documents/pdf/wood%20charcoal.pdf, 2011, 2015.10.14,

[4] Kaltschmitt, M., H. Hartmann & H. Hofbauer: Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-85095-3, 2009, 2015.10.14,

[5] Girard, P.: Charcoal production and use in Africa: what future? In: *Unasylva 211* (53), 2002

[6] Food and Agriculture Organization of the United Nations, http://www.fao.org/docrep/x5555e/x5555e07.htm#6.1.1 lump charcoal, 2015.10.14

[7] APA: Österreichs Grillkohle kommt aus Osteuropa und Deutschland. Wirtschaftsblatt.at. http://wirtschaftsblatt.at/home/nachrichten/oesterreich/1138574/index, 2002, 2015.10.14,

[8] Guilherme Correa Abreu, João Andrade de Carvalho Jr., Bernardo Enne Correa da Silva & Rinaldo Henrique Pedrini: Operational and environmental assessment on the use of charcoal in iron ore sinter production, Journal of Cleaner Production, http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615003583, 2015, 2015.10.14

[9] Flauger, J., M. Murphy, R. Palm & W. Reuter: Entsteht eine neue Zeche im Ruhrgebiet?, Handelsblatt, http://www.handelsblatt.com/unternehmen/industrie/koks-kohle-foerderung-entsteht-eine-neue-zeche-im-ruhrgebiet/6243292.html, 2012, 2015.10.14

[10] Bobi Ihr Kohlenhändler, http://www.bobi.at/preise/bobi_preise.pdf, 2015.10.14

[11] Freedonia: World Activated Carbon - Industry Market Research, Market Share, Market Size, Sales, Demand Forecast, Market Leaders, Company Profiles, Industry Trends and Companies including Calgon Carbon, Cabot Norit Activated Carbon and MeadWestvaco. Online verfügbar unter http://www.freedoniagroup.com/World-Activated-Carbon.html, 2015, 2015.10.14

[12] Schaeffer, K.: The acitvated carbon market 2012 supply and pricing update http://archive.wcponline.com/pdf/1206Schaeffer.pdf, 2012, 2015.10.14

[13] Pflanzenkohle – Datenbank Zusatzstoffe:

http://www.zusatzstoffe-online.de/zusatzstoffe/29.e153_pflanzenkohle.html, 2013, 2015.10.14

[14] Europäische Union: VERORDNUNG (EU) Nr. 1129/2011 DER KOMMISSION vom 11. November 2011 zur Änderung des Anhangs II der Verordnung (EG) Nr. 1333/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf eine Liste der Lebensmittelzusatzstoffe der Europäischen Union. https://www.verbrauchergesundheit.gv.at/lebensmittel/rechtsvorschriften/eu/verordnung_eu_1129_2011_vom_11._november_2011.pdf?4e90vw, 2015.10.14

[15] Kooperationspartner – Wissensdatenbank für biologische Landwirtschaft:

http://www.biola.at/kooperationspartner.html, 2015.10.14

[16] Dibowski, S.: E153/Pflanzenkohle:

http://www.flaggen.familienbande24.de/medizin/lebensmittel/lebensmittelzusatzstoffe/E153.html,2012, 2015.10.14

[17] Europäische Union: VERORDNUNG (EU) Nr. 231/2012 DER KOMMISSION vom 9. März 2012 mit Spezifikationen für die in den Anhängen II und III der Verordnung (EG) Nr. 1333/2008 des Europäischen Parlaments und des Rates aufgeführten Lebensmittelzusatzstoffe, http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:083:0001:0295:DE:PDF, 2015.10.14

[18] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft – Tierernährung – Futtermittelzusatzstoffe:

http://www.bmel.de/DE/Tier/Tierernaehrung/_texte/Futtermittelzusatzstoffe.html, 2015.10.14

[19] Gerlach, A.: Pflanzenkohle in der Rinderhaltung, Ithaka – Journal 1/2012, http://www.ithaka-journal.net/pflanzenkohle-in-der-rinderhaltung, 2012, 2015.10.14

[20] Rödiger, J-M, W. Ganagin, A. Krieg, C. Roth & A. Loewen: Steigerung des Biogasertrages durch die Zugabe von Pflanzenkohle. Hg. v. Erich Schmidt Verlag GmbH & CO KG. Berlin, 2014

[21] Europäische Union: Verzeichnis der zugelassenen Futtermittel-Zusatzstoffe (1), veröffentlicht gemäß Artikel 9t Buchstabe b) der Richtlinie 70/524/EWG des Rates über Zusatzstoffe in der Tierernährung, 2004

[22] Eidgenössische Volkswirtschaftsdepartement: Verordnung des EVD über die Produktion und das Inverkehrbringen von Futtermitteln, Zusatzstoffen für die Tierernährung, Silierungszusätzen und Diätfuttermitteln. FMBV, 2009

[23] Schmidt, H. P.: 55 Anwendungen von Pflanzenkohle. Hg. v. Delinat-Institut für Ökologie und Klimafarming. Arbaz (1), http://ithaka-journal.net/druckversionen/162012-pflanzenkohle-anwendungen.pdf, 2012, 2015.10.14

13 TABELLENVERZEICHNIS:

Tabelle 1: Die 10 grössten Biokohle-Produktionsländer 2005 (einschliesslich Holzkohle) [2] 80
Tabelle 2: Biokohleproduktion unterteilt in Regionen [3] 81
Tabelle 3: Kohleanwendung [6] 81
Tabelle 4: Grillkohle Import Österreich 2009 [7] 82
Tabelle 5: Rohstoffe Aktivkohle, Quelle: [12] 83
Tabelle 6: Verwendungsbedingungen von E153 nach Lebensmittelkategorie der EU, modifiziert nach [14] 83
Tabelle 7: Übersetzungen E153 Pflanzenkohle [16] 84
Tabelle 8: E153 Pflanzenkohle modifiziert nach [17] 84
Tabelle 9: Normen und Rechtsvorschriften 86
Tabelle 10: Anwendungsbereich Biokohle [23] 87

14 ABBILDUNGSVERZEICHNIS:

Abbildung 1: Sequentieller Ablauf bei der thermochemischen Umwandlung von Biomasse inkl. Temperaturbereiche (Quelle: G. Dunst) 30
Abbildung 2: Schema einer gestuften Vergasung (Quelle: G. Dunst) 31
Abbildung 3: Möglichkeiten der pyrolytischen Herstellung von Biokohle (Quelle: G. Dunst) 33
Abbildung 4: Schema eines Reaktors zur hydrothermalen Karbonisierung mit den Anschlüssen zur Druck- und Temperaturkontrolle 34
Abbildung 5: Einflussfaktoren auf die THG-Vermeidungskosten von Biokohle. Die Boxplots zeigen die Elastizitäten zwischen den THG-Vermeidungskosten und den berücksichtigten Einflussfaktoren für eine Anlage mittlerer Größe (Kapazität von 16.000 t Biomasse a-1) mit langsamer Pyrolyse.(Quelle: [3]Bruckmann et al., 2016) 37
Abbildung 6: Elektronenmikroskopische Aufnahme von Biokohle (Quelle: Franz Zehetner) 39
Abbildung 7: Biokohle Produktionsstätten, Quelle: [2] 79
Abbildung 8: Anteile der Länder an der gesamten Biokohle Produktion (einschließlich Holzkohle), Quelle: [2] 80
Abbildung 9: Biokohle Produzenten (linkes Bild), Entwicklung der Biokohleproduktion (rechtes Bild), Quelle: [3] 81
Abbildung 10: Zehn größte Biokohle Exportländer (linkes Bild), zehn größte Biokohle Importländer (rechtes Bild), Quelle: [3] 82

MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH

bmlfuw.gv.at

FÜR EIN LEBENSWERTES ÖSTERREICH.

UNSER ZIEL ist ein lebenswertes Österreich in einem starken Europa: mit reiner Luft, sauberem Wasser, einer vielfältigen Natur sowie sicheren, qualitativ hochwertigen und leistbaren Lebensmitteln.
Dafür schaffen wir die bestmöglichen Voraussetzungen.

WIR ARBEITEN für sichere Lebensgrundlagen, eine nachhaltige Lebensart und verlässlichen Lebensschutz.

MINISTERIUM
FÜR EIN
LEBENSWERTES
ÖSTERREICH

www.bmlfuw.gv.at