

Gefährdungspotenzial von Biokohle aus Landschaftspflegematerial (Gras) hinsichtlich einer Verwendung zur Bodenverbesserung

April 2011

INHALTSVERZEICHNIS

1. Kurzeinführung Carbonisierungsverfahren für Biomasse
2. Mögliche Schadstoffe in Biokohlen je nach Verfahren
3. Derzeitiger Stand gesetzliche Eingruppierung von „Biokohle“ für die Bodenanwendung
4. Ziel der vorliegenden Studie
5. Ergebnisteil
 - 5.1. Herkunft Biokohlen, Probenvorbereitung und untersuchte Schadstoffe
 - 5.2. Unbedenklichkeitseinschätzung der Applikation der untersuchten Biokohlen
 - 5.2.1. Orientierung nach der AbfklärV
 - 5.2.2. Orientierung an der Bodenschutzverordnung (BBodSchV)
 - 5.2.3. Orientierung am Düngemittelrecht und Düngemittelverordnung (DüMV)
 - 5.2.4. Orientierung an der Bioabfallverordnung (BioAbf)
 - 5.3. Einschätzung der Unbedenklichkeit (s. Tabellen 2 – 8)
 - 5.3.1. Ergebnisse Organische Verbindungen mit toxischen Wirkungen
 - a) Dioxine (PCDD/PCDF)
 - b) PCB
 - c) PAK
 - d) AOX
 - 5.3.2. Anorganische Verbindungen mit toxischen Wirkungen
6. Zusammenfassende Bewertung der Biokohlen
7. Literaturliste
8. Abbildungen

Anlage:

Tabelle „1-15“ aus LUBW zur Bewertung von PAK nach Orientierungswerten

1. Kurzeinführung Carbonisierungsverfahren für Biomasse

Für die vorliegende Studie interessierten zwar nur pyrolytisch erzeugte Biokohlen, jedoch ist es sinnvoll, eine Begriffsbestimmung samt Einführung in die Unterschiede innovativer Verfahren zur Herstellung von Biokohle zu geben.

Carbonisierung meint allgemein die Verkohlung von kohlenstoffhaltigen Produkten (Carbon = Kohle). Es werden derzeit zwei Techniken der Carbonisierung weiterentwickelt: **Pyrolyse und HTC**. Ihre Carbonisierungsprodukte sind sehr verschieden.

Pyrolyse ist ein Verschmelzungsvorgang unter Sauerstoffarmut, bei dem neben anderen Produkten Koks/Biokohle entsteht. Es herrschen meist Temperaturen von 350 – 650 Grad Celsius. Die Biomasse wird hierbei unter ausgeprägtem Strukturverlust des Gewebes carbonisiert (s. Abb. 1 und 2). Es gibt kein einheitliches Pyrolysesystem, jede Entwicklung hat andere Merkmale in Umsetzung und Output.

Bei **HTC (hydrothermale Carbonisierung)** handelt es sich um ein chemisch ganz anderes Verfahren. Es funktioniert ähnlich einem Dampfdrucktopf unter Sauerstoffabschluss, meist bei 200 – 220 Grad Celsius mit Drucken von ca. 20 bar und 80 %igem Wasseranteil im Reaktor. Beim Verfahren lösen sich sämtliche Strukturen der Biomasse auf und man erhält eine Schlammkohlemasse, die im getrockneten Zustand ein verwertbares Verkohlungsprodukt ergibt. Es gibt kein einheitliches HTC-System, jede Entwicklung hat andere Merkmale in Umsetzung und Output.

2. Mögliche Schadstoffe in Biokohlen je nach Verfahren

Für eine Bodenanwendung sind alle Stoffe ungünstig, die schwer abbaubar sind und sich auf diese Weise in Lebewesen akkumulieren. Bei der thermischen Umsetzung von Kohlenwasserstoffen in Biomasse entstehen jedoch viele neue Verbindungen mit oft toxischer Wirkung für die Umwelt. Voruntersuchungen zur Einschätzung der grundsätzlichen Verwertbarkeit von Biokohlen für die Bodenverbesserung sind daher sehr wichtig.

In Bezug auf die möglichen Schadstoffe bei der pyrolytischen Verwertung sind im Verkohlungsprodukt besonders organische Verbindungen wie Dioxine, PAK und PCB zu nennen. Beim HTC-Verfahren kommt es als Nassverfahren zwar nicht zur Bildung von Verbindungen wie Dioxinen, jedoch vielmehr zu organischen Verbindungen wie Phenolen, die sowohl im kohleähnlichen HTC-Feststoff als auch im HTC-Prozesswasser für eine Bodenanwendung kritisch werden könnten.

3. Derzeitiger Stand gesetzliche Eingruppierung von „Biokohle“ für die Bodenanwendung

Für die Biokohle-Anwendung von Böden gibt es (noch) keine eigenen gesetzlichen Bestimmungen. Nach der Düngemittelverordnung ist Holzkohle als traditioneller Bodenhilfsstoff auf der Positivliste unter der Rubrik „Kohlen“ aufgeführt (DüMV, Tabelle 7.1.10) und ist traditionelles Mittel zur Bodenverbesserung im Hausgarten (Allgemeine Gartenzeitung 1840). Holzkohle ist zwar ebenso ein Verkohlungs- bzw. Pyrolyseprodukt, ob jedoch Verkohlungsprodukte aus anderen Biomassen, bspw. aus Blattmaterial oder Gras ohne Einschränkung in dieselbe Kategorie gezählt werden können, ist noch offen.

Für eine Einstufung der Umweltverträglichkeit bei der Bodenverwendung von „neuen Biokohlen“ bieten sich mehrere Verordnungen in Deutschland und der EU an. So enthalten die Bundes-, Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) von 1999 sowie die Abfallverordnung AbfKlärV von 1992 (neuer Entwurf 2010) und die EU-Klärschlammrichtlinie von 1986 eine Aussagenrelevanz für Aufbringungsmenge bzw. Höchstkonzentrationen von Stoffen in Böden. Weitere Grundlagen finden sich im Düngemittelrecht bzw. die Düngemittelverordnung DüMV. Gesonderte Empfehlungen einzelner Länder bestehen beispielsweise zu Dioxinen und PCB, s. Handlungsempfehlungen in Veröffentlichungen des LUBW (2010).

Einige gesellschaftliche Initiativen und Forschungseinrichtungen mit Interesse an der regulären und damit gesetzlich abgesicherten Bodenanwendung „neuer Biokohlen“ arbeiten derzeit auf eine Klassifizierung verschiedener Biokohlen hin (s. www.ithaka-journal.net; Stichwort Zertifizierung; Glaser 2010). Im Sinne einer Zertifizierungsmöglichkeit sollen Mindestanforderungen an die Eigenschaften der Biokohlen definiert werden wie zum Beispiel Kriterien wie Oberfläche und Porosität sowie Schadstoffgrenzwerte. Die Aktivitäten umfassen bisher vor allem Verkohlungsprodukte aus der pyrolytischen Verwertung verschiedener Biomassen, beziehen sich jedoch in zunehmendem Maß auch auf die erst seit 2006 „wiederentdeckte“ HTC-Technologie am Max-Planck-Institut in Postdam durch Markus Antonietti („Zauberkohle aus dem Dampfkochtopf“ 2006). Das Hauptaugenmerk bei HTC liegt nach wie vor auf der Brennstoffherzeugung.

Hinweis Schadstoffe bei der Holzvergasung: auch bei der weit verbreiteten Holzvergasung als Technik der Bioenergienutzung entsteht ein Koks- bzw. Kohleprodukt, wenn auch zu viel geringeren Anteilen als bei der Pyrolyse (ca. 5 % gegenüber bis 30 % der TM Biomasse). In Bezug auf Schadstoffe im Verkohlungsprodukt schneidet die Holzvergasung jedoch sehr viel schlechter ab. PAK-Gehalte dieser Produkte sind beispielsweise sehr viel höher (Glaser 2010), sodass in sehr vielen Fällen von einer Bodenanwendung von Koks aus der Holzvergasung abzuraten wäre. Dasselbe gilt auch für Grill-Holzkohle (ebd.).

4. Ziel der vorliegenden Studie

Wie in vielen Landschaftspflegebetrieben fällt auch bei Peter Oehler Material an, das aufwendig in der Entsorgung ist und zusätzliche Kosten verursacht (bis 40 € pro cbm Schnittgut-Abgabegebühr am Schnittgutplatz). Das Material enthält typischerweise Anteile aus Gras, Stauden und verholzten Pflanzenteilen. Es kommt als Ausgangsbiomasse für die pyrolytische Verkohlung bestens in Frage, da sie besser mit gemischten Grün- und Holzanteilen zu Recht kommt als die Verbrennungstechnologie¹¹.

Für den Betrieb von Peter Oehler könnte nach eigener Aussage die pyrolytische Verwertung gegenüber der bisherigen, aufwendigen Entsorgung des eher problematischen Materials einen effizienten Nutzensvorteil bedeuten. Ziel war daher zunächst zu analysieren, ob die vorhandene

¹¹ Für die Verbrennung, die im Gegensatz zu Pyrolyse unter Sauerstoffzufuhr abläuft, eignet sich eher „reineres“ holziges Material, das beispielsweise zu hochwertigeren Holzhackschnitzeln verarbeitet werden kann. Jedoch fallen auch bei solchen Verarbeitungswegen Materialien an (bspw. Siebreste), die sich bestens für eine nachgeschaltete pyrolytische Verwertung eignen (s. www.pyreg.de; www.palaterra.eu, www.swiss-biochar.com)

Technologie zur Carbonisierung von Landschaftspflegematerial zu Verkohlungsprodukten führt, die sich bedenkenlos für die Anwendung als „Biokohle zur Bodenverbesserung“ eignen würden.

Die Biokohleanwendung in Böden ist noch kein etabliertes System und hat noch einige Unbekannte. Die Applikationsmenge scheint beispielsweise sehr variabel zu sein. Die Mindestmengen für eine erzielbare Wirkung sind nicht festgelegt und sehr von den Eigenschaften des Bodens selbst abhängig, sodass der Anwender relativ frei ist in der Mengengabe. Auch die Häufigkeit der Anwendung ist frei, allerdings geht man bei pyrolytischer Biokohle von einer sehr langen Beständigkeit bzw. langsamen Abbaurate aus. So ist es wahrscheinlich, dass einmalige Gaben bis zu Jahrhunderten hinweg eine nachhaltige Bodenwirkung vermitteln können. In vielen Praxisfällen geht man von 1 kg Biokohle pro m² aus (10 t/ha). Andere Anwender postulieren gute Effizienz bei weit geringeren Gaben. Aber auch Extreme von 50 t/ha wären durchaus denkbar (wenn auch nicht ökonomisch) und je nach Nährstoffversorgung des Bodens tolerierbar. In der teilweise Jahrtausend alten, sehr fruchtbaren Terra preta² im Amazonasbecken wurden beispielsweise oft noch höhere Konzentrationen gefunden. Aus der heutigen Ergebnislage der „Terra preta-Forschung“ lässt sich basierend auf Topfversuchen und in Mischung mit Kompost durchaus eine Beziehung zwischen Biokohlemenge und Ertragssteigerung ablesen. Dies scheint besonders auf sandigen Böden der Fall zu sein (Glaser 2010).

² Terra Preta do Indio (portug. dunkle Erde); darunter werden dunkle, fruchtbare, oft meterhohe Bodendecken gefasst, die an vielen Stellen im Amazonasbecken gefunden wurden; erst in den letzten 30 Jahren wurden sie als Zeugnis für Bodenameliorationen in präkolumbianischer Zeit erforscht und entstanden vermutlich unter Zuhilfenahme biotischer Abfälle (Exkrememente, Küchenabfälle usw.) wie auch abiotischen Anteilen in Form von Holzkohle; ähnliche Bodenformationen, aber nicht anthropogenen Ursprungs sind Chernozems, Schwarzerdeböden wZB. in der Ukraine); für Holzkohle werden mehrere Schlüsselfaktoren für eine bodenverbessernde Wirkung postuliert.

Ergebnisteil

5.1. Herkunft Biokohlen, Probenvorbereitung und untersuchte Schadstoffe

Es wurde Gras von zwei unterschiedlichen Standorten pyrolytisch umgesetzt (s. Tab. 1). Die Temperaturen bei der Umsetzung betragen bis zu 450 Grad Celsius. Die Biokohle wurde abgelöscht und je 200 g lufttrocken an das Untersuchungslabor der Fa. Ökometric GmbH geschickt. Zur exakten Trocknung wurden die Proben zunächst gefriergetrocknet (d.h. wasserfrei). Für die Herstellung des Rohextrakts für die Untersuchung von Dioxinen (+Furanen), PCB und PAK wurde die gleiche Extraktionsmethode verwendet. Die Verbindungen wurden zur nachfolgenden Detektion über eine gemischte Al-Oxid-Silikasäule gereinigt und über Gaschromatographie (GCMS) bestimmt.

Dioxine, PCB und PAK wurden im eigenen Labor von Ökometric GmbH untersucht, Schwermetalle und AOX in einem Partnerlabor.

Herkunft und Ausgangsbiomasse für Proben A und B	TS-Gehalt des Grases	Gewichtsreduktion durch Pyrolyse: (prozentuales Verhältnis Masse Biokohle zu Biomasse)	Foto Biokohle	Korngrößen [mm]	Ans Labor versandte Biokohlemenge
A: Graswiese 1, grasiges Material	85 %	19,2 %	s. Abb. 1	0,2 - 20	200 g
B: Graswiese 2, grasiges Material	83 %	25 %	s. Abb.2	0,2 - 20	200 g

Tab. 1: Eigenschaften Biomasse zum Versandzeitpunkt (ca. 2 Tage nach Gewinnung durch Pyrolyse) und einige Kriterien zur Beschreibung der resultierenden Biokohle

Die Untersuchungen sollten vor allem solche Verbindungen einschließen, die prozesstechnisch typischerweise unter den angelegten Temperaturen entstehen und in kritischen Konzentrationen gegen eine Bodenanwendung der Biokohle sprechen würden. Es handelt sich hier um Schadstoffe, die als schwer abbaubare organische Verbindungen mit toxischer Wirkung für Mensch und Tier bekannt sind und wie sie beispielsweise auch in Zigarettenrauch und Dieselabgasen vorkommen:

Polychlorierte Dioxine und Furane (15 PCDD/PCDF); PCB (6 PCB nach DIN); PAK; AOX.

Daneben wurden die Biokohleproben auf Schwermetalle untersucht, wobei die Werte selbstverständlich durch den Vorgehalt in den Biomassen bestimmt werden:

Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg, Zn.

5.2. Unbedenklichkeitseinschätzung der Applikation der untersuchten Biokohlen

In den folgenden Abschnitten werden Verordnungen vorgestellt, die zur Beurteilung des Gefährdungspotenzials bzw. der Unbedenklichkeit des möglichen, noch relativ neuen „Bodenhilfsstoffs Biokohle“ herangezogen werden könnten. Die Bestimmungen ergänzen oder beziehen sich in Detailfragen aufeinander.

5.2.1 Orientierung nach der AbfKlärV

Die AbfKlärV regelt die Aufbringungsmöglichkeiten für Klärschlamm bzw. Klärschlammkomposten auf landwirtschaftlich genutzte Flächen. Für die Applikation werden Grenzwerte für Schadstoffe im Gehalt der jeweiligen Restbiomasse als Menge [g] pro kg Trockenmasse Aufbringsubstanz angegeben (s. § 4 Aufbringungsverbote und Beschränkungen). Außerdem besteht ein Anwendungsverbot, wenn die Böden bestimmte Vorgehalte aufweisen. § 6 regelt die Aufbringmenge und -häufigkeit. Würde man die dortigen Bestimmungen auch als Regelungsgrundlage für Biokohlen heranziehen, dürften nur 5 Tonnen TM innerhalb von 3 Jahren pro ha aufgetragen werden. Gelten würde aller Wahrscheinlichkeit nach ebenfalls die Regelung für die Mischung mit Komposten wie für Klärschlammkomposte (§ 6). Diese dürfen nur dann innerhalb des angegebenen Zeitraums aufgebracht werden, wenn die Schadstoffgehalte im Klärschlammkompost die Hälfte der gemäß § 4 Abs. 12 zulässigen Schwermetallgehalte und die Hälfte der gemäß § 4 Abs. 10 zulässigen Gehalte an organischen Schadstoffen nicht überschreiten.

Die Verordnung der Klärschlammverwendung wurde in den letzten Jahren angepasst, sodass derzeit ein zweiter Entwurf für eine Neufassung mit strengeren Bestimmungen besteht (s. Entwurf AbfKlärV Anlage 1 zu § 4 Absatz 5). Im Fall einer Abweichung von den vorherigen Werten, wurden sie in Klammern gesetzt.

5.2.2. Orientierung an der Bodenschutzverordnung (BBodSchV)

Im Fall der BBodSchV werden Grenzwerte (§ 12 Vorsorgewerte) für Höchstbelastungen in Böden angegeben, bei denen eine Nutzung zur Lebensmittelerzeugung noch erlaubt ist. Wird diese Verordnung als Orientierung für die Biokohle-Anwendung herangezogen, ist nicht nur der Ausgangszustand der Böden entscheidend, sondern auch die Bodenart, z.B. ob tonig, lehmig-schluffig oder sandig.

Des Weiteren ist wichtig, in welcher Auftragsmenge und Häufigkeit die Biokohle auf die Bodenfläche gelangen soll. Unterstellt man wiederum die theoretisch sehr hohe Gabe von 5 kg Biokohle pro m² Bodenfläche (50 t/ha) und nimmt eine Einarbeitungstiefe in die oberen 10 cm des Bodens an, so würden bei einem mittleren Trockenraumgewicht von 1,5 kg pro Liter natürlich gelagertem Ackerboden letztendlich 5 kg Biokohle in 150 kg Boden TM eingemischt, d.h. der Verdünnungsfaktor der eingebrachten Stoffe wäre ca. 1 : 30 (s. Tab. 2 – 8).

5.2.3. Orientierung am Düngemittelrecht und der Düngemittelverordnung (DüMV)

Im Düngemittelrecht gelten die Bestimmungen für Grenzwerte nach der AbfKlärV. Die DüMV (Düngemittelverordnung), die das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln regelt, weist bestimmte Stoffgruppen aus, die als Düngemittel in Frage kommen oder ausgeschlossen werden. In Tabelle 7.1.10 der DüMV wird

Holzkohle aus chemisch unbehandeltem Holz erlaubt als Ausgangsstoff für Kultursubstrate und als Trägersubstanz in Verbindung mit der Zugabe von Nährstoffen über zugelassene Düngemittel.

5.2.4. Orientierung an der Bioabfallverordnung (BioAbfV)

Auch in der Verordnung über die Verwertung von Bioabfällen auf landwirtschaftlich, forstwirtschaftlich und gärtnerisch genutzten Böden (Bioabfallverordnung, BioAbfV) lassen sich Hinweise auf die Verwendbarkeit von Biokohle finden. So schließt die Verordnung auch die Verwendung von Bioabfällen pflanzlicher Herkunft in Mischung mit anderen Zusatzstoffen wie Torf oder mineralischen Bestandteilen ein. Auch wird von der Verwendungsmöglichkeit „hygienisierter Bioabfälle“ gesprochen. In diese Kategorien könnte auch Biokohle fallen. Die Bestimmungen zu Grenzwerten der anderen Verordnungen bleiben Voraussetzung.

5.3. Einschätzung der Unbedenklichkeit (s. Tabellen 2 – 8)

Die gemessenen Schadstoffgehalte der Biokohlen laut Prüfberichte Nr. 0382/11-1 und 0382/11-2 von Ökometric GmbH sind noch einmal in Tabellen 2 – 8 aufgeführt. Die Werte werden nun verglichen mit Grenzwerten oben genannter Gesetzesgrundlagen, soweit möglich einschließlich der für Baden-Württemberg (BW) nächstliegenden Bestimmungen.

Für die vorliegende Studie wurde zur Einschätzung der Unbedenklichkeit bewusst eine fiktive, extrem hohe Biokohle-Gabe von 50 Tonnen Biokohle pro Hektar zugrunde gelegt (s. Tab. 2 – 8: 50 t Biokohle/ha = 5 kg Biokohle/m² Bodenfläche). Anhand dieser Extremannahme kann das Gefährdungspotential einer Biokohleanwendung am besten eingeschätzt werden. Da man in der Realität schon aus ökonomischen Gründen von einer nachhaltigen Biokohle-Bodenanwendung mit 10 bis 20 t/ha ausgeht, wäre in der Praxis von weitaus geringeren Schadstoffeinträgen auszugehen. In Orientierung an § 6 AbfKlärV müsste sich in der landwirtschaftlichen Anwendung die Aufbringmenge von 10 t/ha über 6 Jahre erstrecken.

Die jeweils miteinander verglichenen Wertepaare sind in den einzelnen Tabellen fett bzw. kursiv fettgedruckt.

5.3.1. Ergebnisse Organische Verbindungen mit toxischen Wirkungen

a) Dioxine (PCDD/PCDF)

Dioxine sind eine Gruppe organischer Verbindungen, die nicht oder nur schwer abgebaut werden und sich in Geweben von Lebewesen anreichern können.

Laut Prüfberichte Nr. 0382/11-1 und -2 wurden für die Gruppe der Dioxine die 15 wichtigsten polychlorierten Dibenzodioxine und Dibenzofurane (PCDD/PCDF) gemessen. Nach NATO/CCMS-TE waren Spuren nachweisbar mit Gehalten von 0,6 ng/kg Trockensubstanz für Probe A bzw. 0,01 ng/kg Trockensubstanz für Probe B.

Nach Vorschlägen der Bund und Länder Arbeitsgruppe Dioxine gilt, dass noch bei in Böden gefundenen Werten < 5 ng I-TEQ³/kg TM jegliche Nutzung der Böden ungeprüft möglich sei (s. 1991

³ Zusammenfassende Erklärungen zur Bestimmung und Einschätzung von Dioxinen und PCB über Toxizitätsäquivalenzfaktoren (TEF) siehe LUBW-Schrift von 2010 (www.lubw.baden-wuerttemberg.de)

Richtwerte und Handlungsempfehlungen zur Bodennutzung und –sanierung der B/L-AG Dioxine; s. auch LUBW-Schrift 2010).

	Dioxin-Gehalt in Biokohle-Probe	Biokohlemenge im Applikations-szenario „hohe Gaben“ (50 t/ha = 5 kg/m ²)	Verdünnungs-faktor bei Einarbeitung in die oberen 10 cm Boden (bei mittlerer Trockenraum-dichte TRD: 1,5 kg/L Boden)	Konzentration von Dioxin pro kg Boden nach Biokohle-Applikation	Dioxin-Gehalt Unbedenklichkeitsgrenze in Böden (BBodSchV)	Dioxin-Grenzwert in Klärschlamm zur Aufbringung auf Böden (AbfKlärV)	Bewertung Dioxin-Gehalt der vorliegenden Biokohlen
	ng/kg TM Biokohle	kg/m ² Bodenfläche	Verdünnung im Bodenvolumen	ng/kg TM Boden	ng/kg TM Boden	ng/kg TM Klärschlamm	
A	0,6	5	1 : 30	0,1	5	100 (30)	unbedenklich
B	0,01	5	1 : 30	0,0017	5	100 (30)	unbedenklich

Tab. 2: Werte und Bewertung Dioxin-Gehalt zweier Biokohle-Proben hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit für die Boden-anwendung der Biokohle nach AbfKlärV (Neuentwurf in Klammern)

Die Werte für Dioxine wären auch nach dem strengeren Neuentwurf der AbfKlärV weit entfernt vom kritischen Grenzwert von 30 ng/kg TM für Klärschlamm. Auch nach der BBodSchV liegen die Werte weit außerhalb der kritischen Konzentration von 5 ng/kg TM Boden. Die Biokohle beider Ausgangsbiomassen wäre also vom Dioxin-Gehalt her unbedenklich für die Boden-anwendung, auch dann, wenn man von sehr hohen Biokohlegaben ausginge.

b) PCB

Die dioxinähnlichen polychlorierten Biphenyle (PCB) sind giftig und zum Teil krebserregend. Wegen ihrer hohen Stabilität wurden sie vor Ihrem Verbot 1989 als Isolier-, Hydraulik- und Kühlflüssigkeiten eingesetzt. Sie umfassen eine Gruppe von 200 Verbindungen, von denen typischerweise 6 als Indikatorverbindungen analysiert werden. So wurden die Nummern PCB 28, 52, 101, 138, 153 und 180 untersucht, auf deren Summe auch die AbfKlärV Bezug nimmt.

	Summe 6 PCB Gehalt in Biokohle-Probe	Biokohlemenge im Applikations-szenario „hohe Gaben“ (50 t/ha = 5 kg/m ²)	Verdünnungsfaktor bei Einarbeitung in die oberen 10 cm Boden (bei mittlerer Trockenraum-dichte TRD: 1,5 kg/L Boden)	Theoretische Konzentration von PCB pro kg Boden nach Biokohle-Applikation	PCB-Grenzwert in Klärschlamm zur Aufbringung auf Böden (AbfKlärV)	Bewertung PCB-Gehalt der vorliegenden Biokohlen bei hohen Gaben
	µg/kg TM Biokohle	kg/m ² Bodenfläche	Verdünnung im Bodenvolumen	µg/kg TM Boden	µg/kg TM Klärschlamm	
A	3	5	1 : 30	0,1	100	unbedenklich
B	< 1	5	1 : 30	0,03	100	unbedenklich

Tab. 3: Werte und Bewertung PCB-Gehalt zweier Biokohle-Proben hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit für die Boden-anwendung nach AbfKlärV

	Summe 6 PCB Gehalt in Biokohle-Probe	Biokohle-menge im Applikations-szenario „hohe Gaben“ (50 t/ha = 5 kg/m ²)	Verdünnungs-faktor bei Einarbeitung in die oberen 10 cm Boden (bei mittlerer Trockenraum-dichte TRD: 1,5 kg/L Boden)	Theoretische Konzentration von PCB pro kg Boden nach Biokohle-Applikation	Vorsorgewert nach BBodSchV § 8, Anhang 4, Tabelle 4.1.		Bewertung PCB-Gehalt der vorliegenden Biokohlen bei hohen Gaben
	µg/kg TM Biokohle	kg/m ² Bodenfläche	Verdünnung im Bodenvolumen	µg/kg TM Boden	µg/kg TM Boden bei > 8% Humus	µg/kg TM Boden bei ≤ 8% Humus	
A	3	5	1 : 30	0,1	100	50	unbedenklich
B	< 1	5	1 : 30	0,03	100	50	unbedenklich

Tab. 4: Werte und Bewertung PCB-Gehalt zweier Biokohle-Proben hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit für die Boden-anwendung nach BBodSchV

Wie Tabellen 3 und 4 zeigen, bestünden keine Bedenken gegen eine Boden-anwendung aufgrund des PCB Gehalts der beiden Biokohlen, auch nicht bei theoretisch hochdosierten Biokohle-Gaben von 50 t/ha.

c) PAK

PAK, polizyklische Kohlenwasserstoffe, bestehen aus zwei oder mehreren Benzolringen und werden als Bestandteile von Pyrolyseprodukten aus Biomasse als organische Verbindungen mit toxischer und krebserzeugender Wirkung aufgeführt (DFG 2002). Besonders die höhermolekularen PAK sind sehr schwer wasserlöslich, persistent gegen natürlichen Abbau und haben eine sehr hohe Feststoffaffinität.

Die EPA-Liste für Priority Pollutants führt 16 PAK auf, die sich hinsichtlich ihrer Toxizität deutlich unterscheiden. In der vorliegenden Studie wurden alle 16 PAK analysiert:

Naphthalin, Acenaphthylen, Acenaphthen, Fluoren, Phenanthren, Anthracen, Fluoranthren, Pyren, Benz(a)anthracen, Chrysen, Benzo(b)fluoranthren, Benzo(k)fluoranthren, Benzo(a)pyren, Dibenz(a,h)anthracen, Indeno(1,2,3-cd)pyren, Benzo(g,h,i)perylene.

Zur Einschätzung von PAK in den Biokohle-Proben wurde als Orientierungshilfe die für BW nächstliegende Verwaltungsvorschrift „VwV Organische Schadstoffe“ herangezogen (MU-BW, 1996; Tabelle „1-15“ LUBW, s. Anlage). In dieser Verordnung sind zum Bodenschutzgesetz Grenzwerte festgelegt für flächenhafte Bodenverunreinigungen. Als Orientierung dient der Belastungswert (B-Wert), d.h. „der Schadstoffgehalt im Boden [...] bzw. der danach abgeschätzte Schadstoffgehalt im Bodensickerwasser oder Kontaktgrundwasser, bei dessen Überschreitung eine Bodenbelastung vorliegt [...]. Belastungswerte gelten für alle Böden, soweit nichts anderes bestimmt ist“. Beim Überschreiten des Belastungswertes ist der Anbau von Nahrungs- und Futterpflanzen grundsätzlich nicht mehr zulässig.

	Summe PAK Gehalt in Biokohle-Probe	Biokohle-menge im Applikations-szenario „hohe Gaben“ (50 t/ha = 5 kg/m ²)	Verdünnungs-faktor bei Einarbeitung in die oberen 10 cm Boden (bei mittlerer Trockenraum-dichte TRD: 1,5 kg/L Boden)	Theoretische Konzentration von PAK pro kg Boden nach Biokohle-Applikation	Vorsorgewert nach BBodSchV nach § 8, Anhang 4, Tabelle 4.1. Linke Spalte entspricht auch VwV Organische Schadstoffe (Tab. „1-15“ in Anlage dieser Studie)		Bewertung PAK-Gehalt der vorliegenden Biokohlen
	mg/kg TM Biokohle	kg/m ² Bodenfläche	Verdünnung im Bodenvolumen	mg/kg TM Boden	mg/kg TM Boden bei > 8% Humus	mg/kg TM Boden bei ≤ 8% Humus	
A	5,61	5	1 : 30	0,19	10	3	unbedenklich
B	3,74	5	1 : 30	0,12	10	3	unbedenklich

Tab. 5: Werte und Bewertung PAK-Gehalt zweier Biokohle-Proben hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit für die Boden-anwendung nach BBodSchV bzw. VwV Organische Schadstoffe BW

Wie in Tabelle 5 gezeigt, wäre nach dem Belastungswert für Böden laut VwV Organische Schadstoffe und dem Grenzwert der BBodSchV auch eine hohe Gabe Biokohle in beiden Proben weit entfernt von kritischen Gehalten für die 16 untersuchten PAK. Die PAK-Konzentrationen, die nach einer Bodenverbesserungsmaßnahme mit 50 t Biokohle/ha vorliegen würden, bewegen sich in beiden Fällen zudem stark im Hintergrundbereich, der für Mineralboden und Humusaufgabe (vgl. Tabelle „1-15“ in beigefügter Anlage).

Die AbfklärV (Grenzwert in Tab. 5 nicht extra aufgeführt) verweist in Bezug auf PAK auf die EU-Klärschlammrichtlinie. Auch hier ist als Grenzwert 10 mg PAK pro kg TM Klärschlamm angegeben.

d) AOX

Die Stoffgruppe umfasst halogenorganische Verbindungen. AOX steht für „absorbierbare organische Halogene“. Diese Verbindungen, die Halogene wie Chlor, Fluor, Brom oder Jod enthalten, sind häufig toxisch und reichern sich in Organismen an. Als Umweltparameter wird AOX als Summenwert besonders in Fließgewässern bestimmt, wo sich die persistenten Verbindungen als giftig für Wasserlebewesen erwiesen haben.

Entsprechend § 3 Abs. 5 AbfKärV müssen Klärschlämme seit 1992 auf AOX hin untersucht werden, wenn sie auf landwirtschaftlich genutzte Böden aufgebracht werden sollen. Das Aufbringen ist verboten, wenn der AOX-Gehalt des Klärschlammes 500 mg/kg Trockenmasse überschreitet.

	AOX-Gehalt in Biokohle-Probe	Biokohle-menge im Applikations-szenario „hohe Gaben“ (50 t/ha = 5 kg/m ²)	Verdünnungsfaktor bei Einarbeitung in die oberen 10 cm Boden (bei mittlerer Trockenraum-dichte TRD: 1,5 kg/L Boden)	Theoretische Konzentration von AOX pro kg Boden nach Biokohle-Applikation	AOX-Grenzwert in Klärschlamm zur Aufbringung auf Böden (AbfKärV)	Bewertung AOX-Gehalt der vorliegenden Biokohlen
	mg/kg TM Biokohle	kg/m ² Bodenfläche	Verdünnung im Bodenvolumen	mg/kg TM Boden	mg/kg TM Klärschlamm	
A	300	5	1 : 30	10	500 (400)	unbedenklich
B	350	5	1 : 30	11,7	500 (400)	unbedenklich

Tab. 6: Werte und Bewertung AOX-Gehalt zweier Biokohle-Proben hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit für die Boden-anwendung nach AbfKärV (Neuentwurf in Klammern)

Wie in Tabelle 6 gezeigt, bestünden auch bei theoretisch hochdosierten Biokohle-Gaben von 50 t/ha keine Bedenken gegen eine Boden-anwendung aufgrund des AOX Gehalts der beiden Biokohlen.

5.3.2. Anorganische Verbindungen mit toxischen Wirkungen

Im Fall der anorganischen Verbindungen ist der Gehalt naturgemäß sehr stark vom Ausgangsgehalt im verwendeten Substrat abhängig. Ihre Giftigkeit beruht ebenfalls auf ihrer Stabilität und dem Vermögen, mit anderen Verbindungen stabile Verknüpfungen einzugehen.

	Summe Schwermetall-Gehalt in Biokohle-Probe	Biokohlemenge im Applikations-szenario „hohe Gaben“ (50 t/ha = 5 kg/m ²)	Verdünnungsfaktor bei Einarbeitung in die oberen 10 cm Boden (bei mittlerer Trockenraumdichte TRD: 1,5 kg/L Boden)	Theoretische Konzentration des jeweiligen Schwermetalls pro kg Boden nach Biokohle-Applikation	Schwermetall-Grenzwert in Klärschlamm zur Aufbringung auf Böden (AbfklärV)	Bewertung des jeweiligen Schwermetall-Gehalts der vorliegenden Biokohlen
	mg/kg TM Biokohle	kg/m ² Bodenfläche	Verdünnung im Bodenvolumen	mg/kg TM Boden	mg/kg TM Klärschlamm	
A: Pb	28	5	1 : 30	0,93	900 (120)	unbedenklich
B: Pb	4,9	5	1 : 30	0,16	900 (120)	unbedenklich
A: Cd	0,19	5	1 : 30	0,01	10 (2,5)	unbedenklich
B: Cd	< 0,10	5	1 : 30	0,003	10 (2,5)	unbedenklich
A: Hg	0,053	5	1 : 30	0,0018	8 (1,6)	unbedenklich
B: Hg	0,013	5	1 : 30	0,0004	8 (1,6)	unbedenklich
A: Cr	21	5	1 : 30	0,7	900 (100)	unbedenklich
B: Cr	400	5	1 : 30	13,34	900 (100)	bedenklich
A: Cu	31	5	1 : 30	1,034	800 (700)	unbedenklich
B: Cu	50	5	1 : 30	1,67	800 (700)	unbedenklich
A: Ni	39	5	1 : 30	1,3	200 (80)	unbedenklich
B: Ni	240	5	1 : 30	8,0	200 (80)	bedenklich
A: Zn	200	5	1 : 30	6,7	2500 (1500)	unbedenklich
B: Zn	240	5	1 : 30	8,0	2500 (1500)	unbedenklich

Tab. 7: Werte und Bewertung Schwermetall-Gehalte (Blei = Pb, Cadmium = Cd, Quecksilber = Hg, Chrom = Cr, Kupfer = Cu, Nickel = Ni, Zink = Zn) zweier Biokohle-Proben hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit für die Boden-anwendung nach AbfklärV

Wie die Ergebnistabelle 7 zeigt, wären bei einer Orientierung nach der Klärschlammverordnung im Hinblick auf Schwermetalle auch im Szenario sehr hoher Biokohlegaben keine Bedenken gegen eine potentielle Boden-anwendung der produzierten Biokohlen einzuwenden. Einzige Ausnahmen wären der Chrom- und Nickel-Gehalt in Biokohle-Probe B mit einem höheren Wert als die für Klärschlammgaben zulässige Grenze, im Fall von Chrom nur im Fall der Übernahme des Neuentwurfs der AbfklärV. Bei einer Boden-anwendung von 10 t Biokohle pro ha, wie üblicherweise empfohlen wird, blieben auch sämtliche enger gefassten Grenzwerte weit unterschritten.

	Summe Schwermetall-Gehalt in Biokohle-Probe	Biokohle-menge im Applikations-szenario „hohe Gaben“ (50 t/ha = 5 kg/m ²)	Verdünnungs-faktor bei Einarbeitung in die oberen 10 cm Boden (bei mittlerer Trockenraum-dichte TRD: 1,5 kg/L Boden)	Theoret. Konzentration des jeweiligen Schwermetalls pro kg Boden nach Biokohle-Applikation	Vorsorgewert nach BBodSchV, § 8, Anhang 4 Tabelle 4.1.	Bewertung des jeweiligen Schwermetall-Gehalts der vorliegenden Biokohlen
	mg/kg TM Biokohle	kg/m ² Bodenfläche	Verdünnung im Bodenvolumen	mg/kg TM Boden	mg/kg TM Boden Ton/Lehm-Schluff/Sand	
A: Pb	28	5	1 : 30	0,93	100/70/40	unbedenklich
B: Pb	4,9	5	1 : 30	0,16	100/70/40	unbedenklich
A: Cd	0,19	5	1 : 30	0,01	1,5/1/0,4	unbedenklich
B: Cd	< 0,10	5	1 : 30	0,003	1,5/1/0,4	unbedenklich
A: Hg	0,053	5	1 : 30	0,0018	1/0,5/0,1	unbedenklich
B: Hg	0,013	5	1 : 30	0,0004	1/0,5/0,1	unbedenklich
A: Cr	21	5	1 : 30	0,7	100/60/30	unbedenklich
B: Cr	400	5	1 : 30	13,34	100/60/30	unbedenklich
A: Cu	31	5	1 : 30	1,034	60/40/20	unbedenklich
B: Cu	50	5	1 : 30	1,67	60/40/20	unbedenklich
A: Ni	39	5	1 : 30	1,3	70/50/15	unbedenklich
B: Ni	240	5	1 : 30	8,0	70/50/15	unbedenklich
A: Zn	200	5	1 : 30	6,7	200/150/15	unbedenklich
B: Zn	240	5	1 : 30	8,0	200/150/15	unbedenklich

Tab. 8: Werte und Bewertung Schwermetall-Gehalte (Blei = Pb, Cadmium = Cd, Quecksilber = Hg, Chrom = Cr, Kupfer = Cu, Nickel = Ni, Zink = Zn) zweier Biokohle-Proben hinsichtlich ihrer Unbedenklichkeit für die Boden-anwendung nach BBodSchV

Die Bewertung der Schwermetallgehalte nach der BBodSchV (Tab. 8) fällt sehr ähnlich zu der nach der AbfKlärV aus, nur dass in keinem Fall auch bei sehr hohen Biokohle-Gaben der Vorsorgewert erreicht wird. Gemäß § 8 und Anhang 4.3. der BBodSchV gelten jedoch noch weitere Einschränkungen. Zum Beispiel wird unterschieden für die jeweilige Bodenart und für pH-Werte des Bodens unter bestimmten Schwellenwerten. Bei Böden mit mehr als 8 % Humusgehalt unterliegt die Festsetzung der Vorsorgewerte außerdem den örtlichen Behörden. Im Fall einer Anwendung von Biokohle müssten daher weiterer Parameter zu Rate gezogen werden. Die die Aufwertung von Böden durch Biokohle vor allem auf weniger gut versorgten Standorten (z.B. sandigen) Erfolg zu haben scheint, würden die zusätzlichen Parameter bei diesen Böden zu einer weiteren Einschränkung der erlaubten Grenzwerte führen. Trotz allem würden bei realistischen Biokohle-Gaben aller Voraussicht nach kaum bedenkliche Konzentrationen zustande kommen, die einer Boden-anwendung widersprechen könnten.

Beurteilung von Biokohle-Kompost-Mischungen

Hinsichtlich der Anwenderpraxis werden Biokohlen aller Voraussicht nach nur als Mischungen mit anderen Komponenten in Frage kommen. Aus Erfahrungen derzeitiger Nachahmungsversuche zur Herstellung von Terra preta ist von einem direkten Aufbringen von pyrolytischer Biokohle auf Böden schon allein deswegen abzuraten, weil dies kurzfristig zum Nährstoffentzug für Keim- und Jungpflanzen führen kann. Außerdem ist die Gefahr von Winderosion und damit Austrag gegeben. Gute Ergebnisse scheinen sich dagegen mit Vormischungen mit Komposten oder anderen organischen Substanzen wie Trester usw. erzielen zu lassen (s. Palaterra GmbH, Delinat Institut, einzelner schon praktizierender Landwirte sowie Privatgärtner). Durch Mischungsansätze und deren Lagerung für mehrere Wochen oder Monate haben die Biokohlen eine viel bessere Gelegenheit zur Nährstoffbeladung, Wasserbenetzung, Verbundherstellung und Bioaktivierung (d.h. Besiedelung mit Mikroorganismen).

Wie in der AbfklärV für Mischungen von Klärschlamm und Komposten vorgeschrieben (§ 6), würde man bei der Orientierung an der Klärschlammverordnung die Schadstoffgehalte in Biokohle und organischer Substanz aufsummieren, um sie mit den Grenzwerten zu vergleichen. Sollte, wie in § 6 beschrieben, die Summe die Hälfte der für organische und anorganische Schadstoff angegebenen Grenzwerte nicht überschreiten, dürften von diesen Mischungen innerhalb von 3 Jahren sogar 10 t pro Hektar (statt nur 5 t) ausgebracht werden.

6. Zusammenfassende Bewertung der Biokohlen

Um die Chancen einer vor-Ort-Verwertung von Landschaftspflegegut (Gras) und gleichzeitigen Herstellung von Biokohle für die Boden Anwendung zu prüfen, wurden Proben aus Grasmahd über zwei innovative, pyrolytische Carbonisierungsverfahren verkohlt.

Um die Bodenverwendbarkeit dieser pyrolytisch gewonnenen Biokohlen aufgrund der zuständigen gesetzlichen Vorgaben zum Schutz von Gesundheit und Umwelt zu prüfen, wurden sie auf eine Reihe von Schadstoffgruppen hin untersucht. Hierzu gehörten polychlorierte Dioxine und Furane (PCDD/PCDF), polychlorierte Biphenyle (PCB), polyaromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und halogenhaltige organische Schadstoffe (AOX) sowie die Schwermetalle Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Hg und Zn. Die erhaltenen Werte wurden mit Grenzwerten aus bestehenden Bestimmungen und Verordnungen verglichen, die für das Aufbringen zugelassener Stoffe wie zum Beispiel Klärschlämme regeln oder die zum Schutz von Boden und Grundwasser festgelegt sind.

In der Praxis würde man aus bisherigen Erfahrungen und ersten Umsetzungen von einmaligen Biokohle-Gaben von 10 bis 20 t Biokohle pro Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche ausgehen. Bezieht man sich auf diese relativ geringen Eintragsmengen, würde dies für die mitgeführten Schadstoffe bedeuten, dass sie weit unterhalb der Grenzwerte nach der Klärschlammverordnung (AbfklärV) oder der Bodenschutzverordnung (BBodSchV) oder anderen Bestimmungen wie der EU-Klärschlammrichtlinie liegen.

Auch im unwahrscheinlichen Szenario extrem hoher Aufbringmengen (50 t/ha) würden bezüglich der untersuchten Biokohlen keine Bedenken für die Aufbringung aufgrund von organischen Schadstoffen bestehen. Nur im Fall der Schwermetalle und nur bei unrealistisch hohen Auftragsmengen wäre für die Gehalte von Nickel bei Probe B nach jetziger AbfklärV und zusätzlich für Chrom nach dem zweiten Entwurf der Neufassung der Verordnung eine Grenzwertüberschreitung zu beobachten. Hierbei ist

anzumerken, dass die Schwermetall-Gehalte nichts mit der thermischen Verfahrenstechnik zu tun haben, sondern den Gehalt des verwerteten Schnittguts abbilden. Zudem stammte die Probe B von Grasflächen außerhalb Deutschlands.

Unter der Annahme, dass pyrolytisch gewonnene Biokohlen so wie Holzkohle nach der Düngemittelverordnung (DüMV) gehandhabt würden und die Grenzwerte wie für dort zugelassene Stoffe gelten, stünde einer Verwendung der untersuchten Biokohlen als Bodenzusatz- oder Bodenhilfsstoff aus Sicht der zuständigen gesetzlichen Bestimmungen nichts im Wege.

Über Biokohlen aus anderen Biomassen, wenn auch über dieselben Verfahren gewonnen, kann zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussage getroffen werden. Anders zusammengesetztes Ausgangsschnittgut oder ein höherer Feuchtegrad könnte eventuell zu höheren Gehalten organischer Schadstoffe führen. Insgesamt ist dies jedoch angesichts des bisher großen Abstands zu den Grenzwerten wenig wahrscheinlich.

7. Literaturliste

AbfKlärV von 1992 (http://bundesrecht.juris.de/abfkl_rv_1992/_4.html)

AbfKlärV, derzeitiger Neuentwurf 2010: <http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/downloads/doc/46373.php>

Allgemeine Gartenzeitung (1840): Nr. 24, 8. Jahrgang

Zauberkohle aus dem Dampfkochtopf (2006) Pressemitteilung der Max-Planck-Gesellschaft zu Versuchen zu HTC-Technologie von Markus Antonietti (<http://www.mpg.de/521319/pressemitteilung20060712>)

BBodSchV, Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999: (<http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/bbodschv/gesamt.pdf>)

BioAbfV, Bioabfallverordnung vom 21.09.1998: (<http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bioabfv/gesamt.pdf>)

DüMV Düngemittelverordnung: (http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_mv_2008/gesamt.pdf)

DFG, Deutsche Forschungsgemeinschaft (2002): Senatskommission zur Prüfung gesundheitsschädlicher Arbeitsstoffe, MAK- und BAT-Werte-Liste 2002, Weinheim [Wiley-VCH]

EU-Klärschlammrichtlinie: Richtlinie 86/278/EWG über Klärschlamm des Rates vom 12. Juni 1986 über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft

Glaser, Bruno 2010: BIOKOHLE – PRODUKTION, ENTWICKLUNG UND CHARAKTERISIERUNG ZUR ANWENDUNG ALS BODENVERBESSERER: (http://www.bacatec.de/dl/Ge09_Glaser-Steiner_deu.pdf)

ithaka-journal.net (Stichwort Zertifizierung)

LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2010): dl-PCB in den Böden von Baden-Württemberg, 71 S. (www.lubw.baden-wuerttemberg.de)

Richtwerte und Handlungsempfehlungen zur Bodennutzung und –sanierung der B/L-AG Dioxine (1991)

Tabelle „1-15“ aus LUBW: Einstufung der PAK-Gehalte in Böden nach verschiedenen Orientierungswerten nach MU-BW, 1996 und UM&SM BW, 1993 (s. Anlage diese Studie)

8. Abbildungen

Pyrolytisch carbonisiertes Gras aus zwei Wiesenflächen

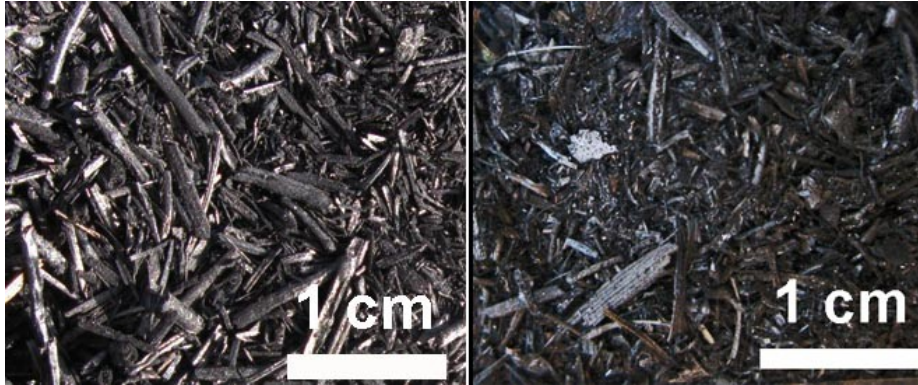


Abb. 1 Probe A

Abb. 2 Probe B

Anlage

Tabelle „1-15“ aus LUBW: Einstufung der PAK-Gehalte in Böden nach verschiedenen Orientierungswerten nach MU-BW, 1996 und UM&SM BW, 1993

Tabelle 1-15	Orientierungswerte
Bezeichnung der Werte	Summe der 16 PAK nach EPA (in mg/kg Boden)
Hintergrundwert (H-Wert) für Mineralboden (Oberboden)	1,00
Hintergrundwert (H-Wert) für organische Auflagen (ohne Streuhorizont)	3,00
Prüfwert für Boden (ausgenommen organische Auflagen) zum Schutz von Wasser	5,00
Belastungswert für Böden zum Schutz von Nahrungs- und Futterpflanzen sowie von Tieren (Aufnahme von Bodenmaterial)	10,00
Belastungswert für Böden zum Schutz von Wasser (Bodensickerwasser und Kontaktgrundwasser)	ohne Naphthalin: 0,15 µg/l Lösung; Naphthalin: 2,00 µg/l Lösung;