

Leitfaden

zur Herstellung und Anwendung von Pflanzenkohlekomposten im Hopfenanbau



Impressum

Herausgeber:

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
Zentrum für Forschung und Wissenstransfer
Institut für Gartenbau
Am Staudengarten 14, 85354 Freising
igb@hswt.de/+49(0)8161 71-3347
www.hswt.de/forschung/forschungseinrichtungen/igb.html

Projektleitung: Dr. Dieter Lohr
Projektbearbeitung: Johannes Görl
Projektmitwirkung: Dr. Elke Meinken

In Zusammenarbeit mit:

HVG Hopfenverwertungsgenossenschaft e.G., Wolnzach

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
Arbeitsgruppe IPz 5a – Hopfenanbau und Produktionstechnik, Wolnzach

Bildnachweis:

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
Zentrum für Forschung und Wissenstransfer
Institut für Gartenbau

Förderung:

Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten
Ludwigstraße 2, 80539 München

Gestaltung:

Hochschule Weihenstephan-Triesdorf
Zentrum für Forschung und Wissenstransfer
Institut für Gartenbau

Freising-Weihenstephan, April 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	4
2	Erzeugung von Pflanzenkohlekomposten.....	5
2.1	Auswahl einer geeigneten Pflanzenkohle.....	5
2.2	Aufsetzen der Kompostmiete.....	6
2.3	Einfluss der Pflanzenkohle auf die Kompostqualität.....	8
3	Anwendung von Pflanzenkohlekomposten.....	10
3.1	Pflanzenbauliche Auswirkungen von Pflanzenkohlekomposten.....	11
3.2	Auswirkung von Pflanzenkohlekomposten auf das Bodenleben.....	14
4	Handlungsempfehlungen für die Praxis	16
5	Verzeichnisse.....	17
5.1	Tabellen- und Abbildungsverzeichnis	17
5.2	Quellenverzeichnis	18

1 Einführung

Das Interesse an der Anwendung von Pflanzenkohlen bzw. Pflanzenkohlekomposten in der Landwirtschaft hat innerhalb der letzten ein bis zwei Dekaden sprunghaft zugenommen. Während sich im Jahr 2010 nur wenige hundert Artikel mit dem Thema beschäftigten, ist ihre Zahl inzwischen auf jährlich über 15.000 angewachsen. Dabei ist vieles von dem, was in den Anfangsjahren postuliert wurde, heute bereits nicht mehr gültig. So wurden Pflanzenkohlen zunächst vor allem direkt und zum Teil auch in sehr hohen Mengen ausgebracht. Inzwischen sind die angewendeten Mengen deutlich gesunken und Pflanzenkohlen werden zumeist nicht mehr pur, sondern in Mischung mit organischen bzw. mineralischen Düngern eingesetzt. Zudem erfolgt in den letzten Jahren zunehmend vorab eine Co-Kompostierung. Den Pflanzenkohlekomposten wird dabei durch Veränderung der chemischen, physikalischen und biologischen Bodeneigenschaften eine Reihe positiver Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit zugeschrieben (Xie et al., 2015; Rizwan et al., 2016; Wu et al., 2017a und b; Zhu et al., 2017; Wang et al., 2021). Besonders interessant für eine Anwendung im Hopfenanbau erscheinen Pflanzenkohlekomposte auf Grund ihrer hohen Sorptionskapazität insbesondere für Kupfer (Wang et al., 2021), da Hopfengärten auf Grund der jahrzehntelangen Ausbringung kupferhaltiger Fungizide zum Teil eine erhebliche Kupferbelastung aufweisen (Kühne et al., 2009; Strumpf et al., 2011). Bei Neupflanzungen kann dies zum Teil zu Anwuchsproblemen der Hopfenpflanzen führen. Dieser Leitfaden zeigt die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung von Pflanzenkohlekomposten im Hopfenanbau – insbesondere zur Minderung der Kupfertoxizität – auf. Die Erkenntnisse basieren im Wesentlichen auf zwei vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Projekten (FKZ G2/KS/19/04 und FKZ A/21/08) sowie Angaben aus der Literatur.

Im ersten Abschnitt des Leitfadens wird die Herstellung von Pflanzenkohlekomposten auf Basis von Hopfenrebenhäckseln beschrieben. Im zweiten Abschnitt steht die Anwendung von Pflanzenkohlekomposten und deren Wirkung auf die Bodenfruchtbarkeit im Allgemeinen bzw. das Pflanzenwachstum im Speziellen im Fokus.

2 Erzeugung von Pflanzenkohlekomposten

2.1 Auswahl einer geeigneten Pflanzenkohle

Bei jeder Art der Kompostierung gilt, dass die Qualität der Inputstoffe über die Qualität des fertigen Komposts entscheidet. Bei der Herstellung von Pflanzenkohlekomposten ist dies besonders zu berücksichtigen. Ganz wesentlich ist dabei die Schadstofffreiheit der eingesetzten Kohlen. Daher sollten nur zertifizierte Pflanzenkohlen verwendet werden (Abb. 1). Besondere Vorsicht ist bei Pflanzenkohlen aus Holzvergaseranlagen geboten, da diese oft eine sehr hohe PAK-Belastung aufweisen. Zum Teil werden auch mittels hydrothormaler Karbonisierung (HTC-Verfahren) erzeugte Karbonisate als Pflanzenkohle bezeichnet. Allerdings weisen HTC-Kohlen völlig andere physikalisch-chemische Eigenschaften auf als die im Rahmen der hier durchgeführten Untersuchungen verwendete Pyrolysekohle, weswegen die Erkenntnisse keinesfalls übertragbar sind.



Abb. 1: Logo des europäischen Pflanzenkohle-Zertifikats (EBC: European Biochar Certificate)

Hinsichtlich der übrigen Eigenschaften – Nährstoffgehalte, Struktur und Stabilität des enthaltenen Kohlenstoffs – muss die ausgewählte Pflanzenkohle zu den anderen Inputstoffen für die Kompostierung sowie zum Anwendungsbereich des fertigen Pflanzenkohlekomposts passen. Grundsätzlich gilt, dass bei höheren Temperaturen hergestellte Pflanzenkohlen stabilere Kohlenstoffverbindungen aufweisen und poröser sind, während die Kationenaustauschkapazität abnimmt. Es muss somit immer ein Kompromiss zwischen Stabilität und Reaktivität gefunden werden. Allerdings sind hierbei noch viele Aspekte unzureichend erforscht und vor allem die zu Grunde liegenden Prozesse nicht hinlänglich bekannt, sodass keine allgemeinen Empfehlungen zur optimalen Kohlenstoffqualität von Pflanzenkohlen möglich sind. Hierbei helfen nur betriebsindividuelle Beobachtungen. Eindeutiger ist die Auswahl der richtigen Struktur: Diese hängt im Wesentlichen vom zu kompostierenden Material ab. Bei sehr feinen und nährstoffreichen Inputstoffen sind eher grobe Pflanzenkohlen zu empfehlen, da diese die ausreichende Belüftung der

Kompostmiete unterstützen. Umgekehrt sollten bei der Kompostierung von groben und holzigen Materialien – wie beispielsweise Hopfenrebenhäcksel – feinere Kohlen zugegeben werden. Sie sorgen durch ihre hohe Porosität für eine gleichmäßigere Feuchtigkeit in der Miete und dienen zusätzlich als besiedelbare Oberfläche für Mikroorganismen, wodurch die Intensität der Rotte gesteigert werden kann. Die Nährstoffgehalte der Pflanzenkohle spielen vor allem dann eine Rolle, wenn nährstoffarme Komposte, die vorrangig zur Bodenverbesserung dienen sollen, erzeugt werden sollen. Ansonsten sind die Nährstoffgehalte eher zweitrangig, da die Nährstoffmengen im fertigen Pflanzenkohlekompost weniger vom Nährstoffgehalt der Pflanzenkohle als vielmehr von dem der übrigen Inputstoffe bestimmt werden.

2.2 Aufsetzen der Kompostmiete

Beim Aufsetzen der Mieten ist darauf zu achten, dass die Pflanzenkohle möglichst gut verteilt wird, um zu verhindern, dass sich während der Kompostierung größere Nester von Pflanzenkohlen bilden. Zudem hat es sich bewährt, wenn die Pflanzenkohlen nicht zu trocken sind. Zum einen wird hierdurch die Staubbildung beim Aufsetzen der Mieten minimiert (Abb. 2) und zum zweiten besteht bei höheren Aufwandmengen an Pflanzenkohle ein geringeres Risiko, dass die Miete durch die Wasseraufnahme der Pflanzenkohle insgesamt zu trocken wird und der Kompostierprozess dadurch nicht ausreichend in Gang kommt.



Abb. 2: Starke Staubbildung beim Aufsetzen einer Pflanzenkohlekompostmiete mit einer zu trockenen Pflanzenkohle

In den Kompostierungsversuchen wurden mit 5 Vol.-% (entsprechend ca. 15 Gew.-%) Pflanzenkohle deutlich positive Effekte erzielt, die durch eine Erhöhung der Aufwandmenge nicht erkennbar gesteigert werden konnten. Durch die Beimischung von 5 Vol.-% wurde der Rotteprozess nachweislich intensiviert. So konnte die thermophile Phase (Temperatur der Kompostmiete > 40 °C) von etwa 30 auf gut 60 Tage verlängert werden (Abb. 3). Das bedeutet eine bessere Hygienisierung und damit eine Verringerung des Risikos einer Verbreitung von Pathogenen wie dem Erreger der Hopfenwelke (*Verticillium albo-atrum*) oder dem HpL-Viroid. Der Kompostierprozess selbst bzw. dessen Steuerung verändert sich durch die Beimischung von Pflanzenkohle nicht. So mussten die Komposte mit Pflanzenkohle nicht mehr oder weniger häufig gewendet werden als der Kompost ohne Kohle und die Notwendigkeit eines Umsetzens konnte über den Verlauf der Mieten-temperatur ermittelt werden. Wichtig ist die Einstellung der richtigen Mietenfeuchte: Dies kann durch eine einfache Faustprobe erfolgen, allerdings fühlen sich Komposte mit hohen Anteilen sehr feiner Pflanzenkohle auch bei ausreichender Feuchtigkeit immer etwas trocken an. Hier ist also Vorsicht geboten, um die Komposte nicht zu vernässen und so unerwünschte anaerobe Bedingungen zu fördern.

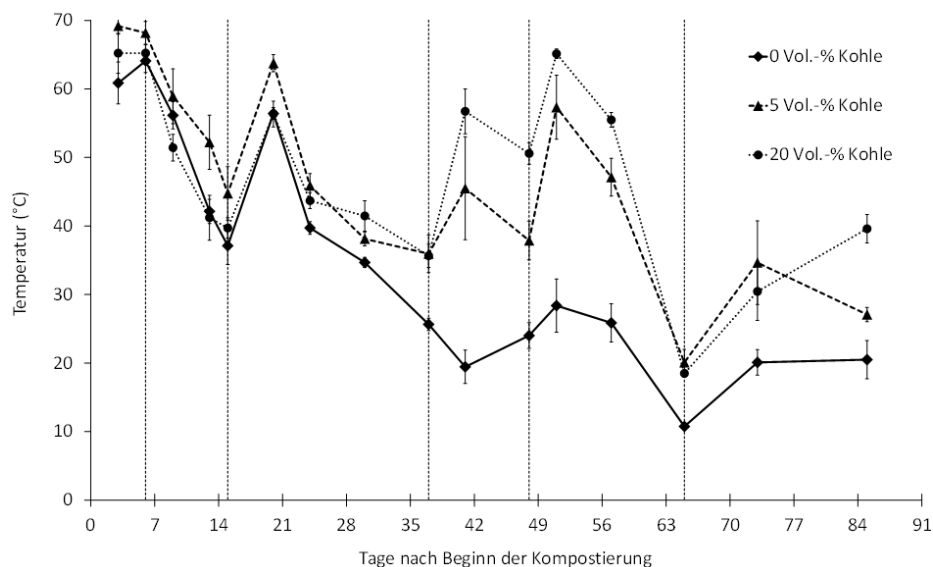


Abb. 3: Verlauf der Mientemperatur während der Kompostierung von Hopfenrebenhäcksel ohne (0 Vol.-% Kohle) sowie mit zwei Mengen an Pflanzenkohle (5 bzw. 20 Vol.-% Kohle). Vertikale Linien kennzeichnen die Umsetzzeitpunkte. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler

2.3 Einfluss der Pflanzenkohle auf die Kompostqualität

Die Intensivierung des Kompostierprozesses durch Pflanzenkohle war auch an einer stärkeren Zersetzung der holzigen Bestandteile der Hopfenrebenhäcksel (Abb. 4) und einem um gut zehn Prozentpunkte höheren Masseverlust bezogen auf das Ausgangsmaterial zu erkennen.

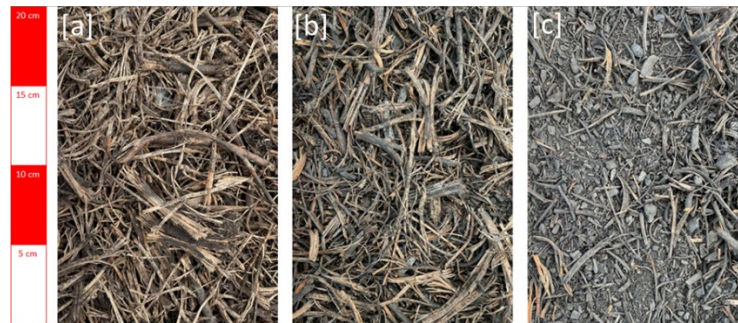


Abb. 4: Kompost ohne Kohle (a) und mit 5 (b) bzw. 20 Vol.-% Pflanzenkohle (c) nach Abschluss des Kompostierprozesses

Allerdings konnte aus den Hopfenrebenhäckseln auch ohne die Zugabe von Pflanzenkohle ein qualitativ hochwertiger Kompost mit Rottegrad V erzeugt werden, der sogar alle Vorgaben der Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGV e.V.) für eine Einmischung von 20 Vol.-% in gärtnerische Kultursubstraten erfüllte. Damit ist eine konzentrierte Applikation einer hohen Menge Kompost in das Pflanzloch von Hopfenjungpflanzen auch problemlos möglich.

Tab. 1: Physikalische und chemische Eigenschaften der aus Hopfenrebenhäckseln hergestellten Komposte ohne (0 % BC) sowie mit 5 bzw. 20 Vol.-% Pflanzenkohle (offene Mietenkompostierung)

Parameter	0 % BC	5 % BC	20 % BC
pH in CaCl ₂	8,0	8,0	8,0
Salz (H ₂ O) in g KCl/l	2,3	3,5	2,7
NH ₄ -N (CAT) in mg/l	4	4	1
NO ₃ -N (CAT) in mg/l	164	285	138
P (CAT) in mg/l	107	234	137
K (CAT) in mg/l	1.487	2.462	2.134
N (gesamt) in g/kg	27	25	13
P (gesamt) in g/kg	2,5	2,2	1,6
K (gesamt) in g/kg	17	19	14
C (gesamt) in g/kg	376	466	629
C/N	14	19	48
Rottegrad (Selbsterhitzung)	V	V	V

Ein Hinweis zur Qualitätsbewertung von Pflanzenkohlekomposten: Bei den meisten Parametern können die für „normale“ Komposte gültigen Richtwerte (z. B. der Bundesgütegemeinschaft Kompost) herangezogen werden. Lediglich beim Gehalt an organischer Substanz sowie beim C:N-Verhältnis ist es nicht der Fall, da Pflanzenkohlekomposte im Vergleich zu konventionellen Komposten einen höheren Gehalt an organischer Substanz bzw. organischem Kohlenstoff aufweisen und demzufolge ein weiteres C:N-Verhältnis haben. Da der enthaltene Kohlenstoff sehr abbaustabil ist, besteht auch bei einem weiten C:N-Verhältnis nicht die Gefahr einer N-Immobilisierung. Gleichzeitig darf der Kohlenstoff auf Grund der hohen Abbaustabilität nicht mit dem anderer Komposte gleichgesetzt werden. Eine Möglichkeit den Gehalt an organischem Kohlenstoff bzw. das C:N-Verhältnis realistisch einzuschätzen, ist die getrennte Bestimmung des gesamten organischen (TOC) und des elementaren Kohlenstoffs (EC) sowie die Berechnung des abbaubaren Kohlenstoffs aus der Differenz der beiden analysierten Kohlenstofffraktionen (AOC = TOC - EC). Anschließend kann das AOC:N-Verhältnis berechnet und wie gewohnt bewertet werden. Aus dem Verhältnis von AOC zu TOC kann zudem eine Aussage über die Stabilität des Pflanzenkohlekomposts getroffen werden: Umso kleiner der Anteil des AOC am TOC ist, umso stabiler ist der Pflanzenkohlekompost und umso länger verbleibt der Kohlenstoff im Boden. Dies zeigt sich in einer zunehmenden thermischen Stabilität des Kohlenstoffs unter nicht oxidierenden Bedingungen (Abb. 5).

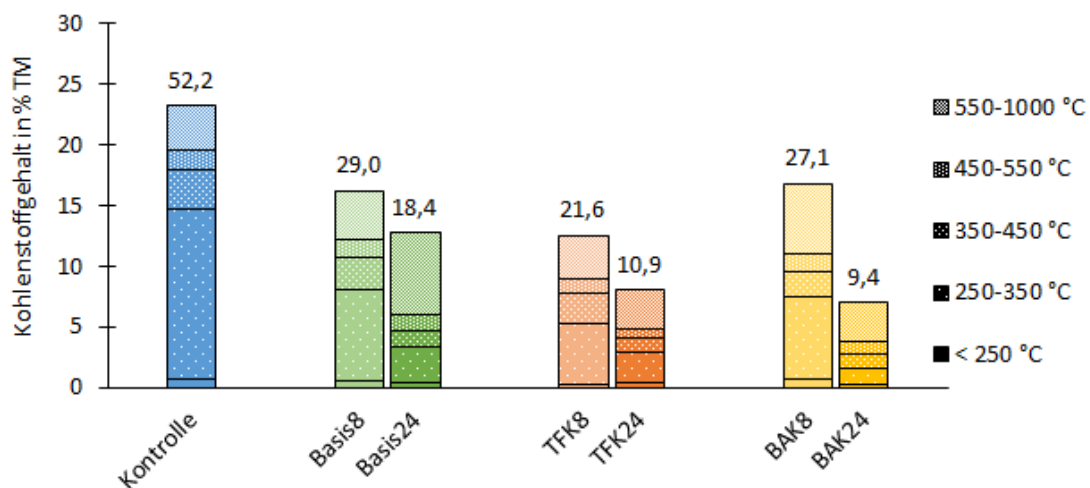


Abb. 5: Thermisch-pyrolytische Fraktionierung des in Pflanzenkohlekomposten (Basis, TFK, BAK bezeichnen unterschiedliche Pflanzenkohlen, die Zahlen kennzeichnen den volumenmäßigen Anteil am Ausgangsmaterial) enthaltenen organischen Kohlenstoffs zwischen 250 und 1000 °C unter einer N₂-Atmosphäre (die Zahl über den Säulen kennzeichnet den Prozentsatz des unter pyrolytischen Bedingungen insgesamt freigesetzten Kohlenstoffs bezogen auf den Gesamt-C_{org} der Proben)

Neuere Erkenntnisse aus der Literatur (Luskar et al., 2022) lassen vermuten, dass bereits mit noch deutlich geringeren Aufwandmengen (ca. 10 Gew.-%) Effekte erzielt werden können, so dass derzeit keine abschließende Empfehlung für die minimal notwendige Aufwandmenge gegeben werden kann. Hier sind die Beobachtungsgabe und das Fingerspitzengefühl der Anwender gefragt. Ursächlich für die Verbesserung des Kompostierprozesses dürfte vor allem eine Verbesserung des Mikroklimas in der Kompostmiete sein: Die relativ feinen Kohlepartikel legten sich als dünner Film um die relativ groben Bestandteile der Hopfenrebenhäcksel und sorgten so vermutlich für eine gleichmäßigere Feuchtigkeit des Materials. Zudem bieten die vielen Poren der Pflanzenkohle ideale Habitate für Mikroorganismen.

3 Anwendung von Pflanzenkohlekomposten

Die Empfehlungen wurden aus einer Reihe von Gefäß- sowie zwei Feldversuchen abgeleitet. Für die Versuche wurden unterschiedliche Böden verwendet, die entweder auf Grund ihrer Bewirtschaftungshistorie eine hohe Kupferbelastung aufwiesen oder für die Versuche gezielt mit Kupfer beaufschlagt wurden. Im ersten Kapitel wird auf die pflanzenbaulichen Auswirkungen eingegangen und im zweiten werden die Effekte auf das Bodenleben beschrieben. Da durch die Anwendung der Pflanzenkohlekomposte primär das Anwachsverhalten von Junghopfen auf kupferbelasteten Standorten verbessert werden sollte, fokussierten sich alle Versuche auf eine konzentrierte Ausbringung der Pflanzenkohlekomposte im Bereich des Pflanzloches (ca. 0,6 m² Fläche). Es ergaben sich daher punktuell sehr hohe Aufwandmengen, die bei einer flächigen Ausbringung 30 bis 60 t Trockenmasse je Hektar entsprächen. Bei einer Pflanzdichte von 2.400 Pflanzen je Hektar sind es auf die gesamte Fläche des Hopfengarten bezogen aber nur etwa 3 bis 6 t Trockenmasse.



Abb. 6: Pflanzlochnahe Ausbringung von Pflanzenkohle bei der Pflanzung von Hopfenfechtern (2,5 kg Trockenmasse je Pflanzloch \approx 60 t/ha)

3.1 Pflanzenbauliche Auswirkungen von Pflanzenkohlekomposten

Sowohl in den Gefäß- als auch den Feldversuchen konnte eine deutlich positive Wirkung der Kompostausbringung festgestellt werden. Im Gefäßversuch führte bei einem gezielt mit Kupfer beaufschlagten Boden selbst eine sehr hohe Kupferbelastung, wie sie in der Praxis nur in Hopfengärten mit über hundertjähriger Nutzungshistorie vorkommt (Strumpf et al., 2011), nach der Beimischung von Kompost nicht zu einer Wachstumsdepression (Abb. 7). Allerdings muss auch konstatiert werden, dass der zusätzlich positive Effekt der mitkompostierten Pflanzenkohle im Vergleich zur reinen Kompostwirkung eher gering ausfiel.

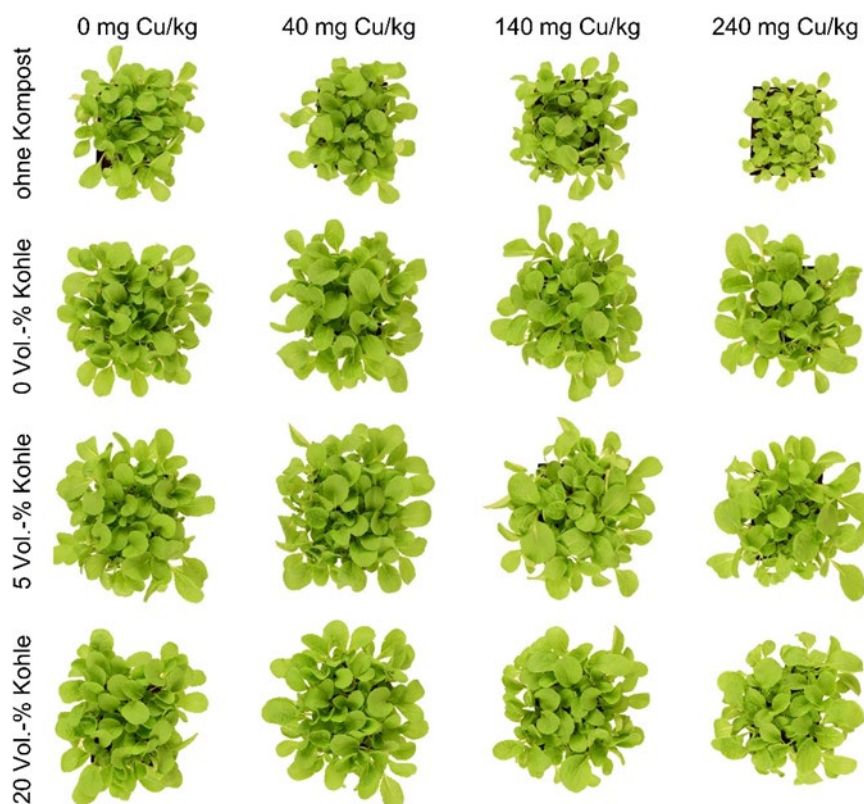


Abb. 7: Wachstum von Chinakohl in einem Boden mit steigender Kupferbelastung ohne Kompost sowie mit einem kohlefreien Kompost (0 Vol.-% Kohle) und zwei Pflanzenkohlekomposten (5 und 20 Vol.-% Kohle)

Eine vergleichbare Wachstumsförderung der Kompostausbringung zeigte sich auch im Feld. Bereits kurz nach der Pflanzung auf einem mittel bis stark mit Kupfer belasteten Boden (100 bis 150 mg Gesamtkupfer/kg Boden) kam es an den Pflanzen, bei denen kein Kompost in das Pflanzloch appliziert wurde, zu sehr starken Chlorosen, während die Pflanzen mit Kompostgabe deutlich gesünder aussahen (Abb. 8). Da der pH-Wert der Fläche mit 5,5 bis 6,0 etwas unterhalb des pflanzenbaulichen Optimums lag, wurde zusätz-

lich eine gekalkte Kontrolle angelegt. Allerdings war die Symptomausprägung in der gekalkten Variante vergleichbar stark wie in der ungekalkten. Im Laufe der Vegetationsperiode nahmen die Schadsymptome zunehmend ab und waren mit Sichtbarwerden der ersten Infloreszenzen (BBCH 51) nicht mehr zu erkennen. Zu Beginn des zweiten Standjahres traten aber erneut Symptome auf, deren Intensität durch die Komposte gemindert werden konnte. In beiden Standjahren war dabei zwar ein positiver Zusammenhang zur ausgebrachten Kompostmenge zu erkennen, ob der Kompost Pflanzenkohle enthielt oder nicht, hatte aber nur einen geringen Einfluss.

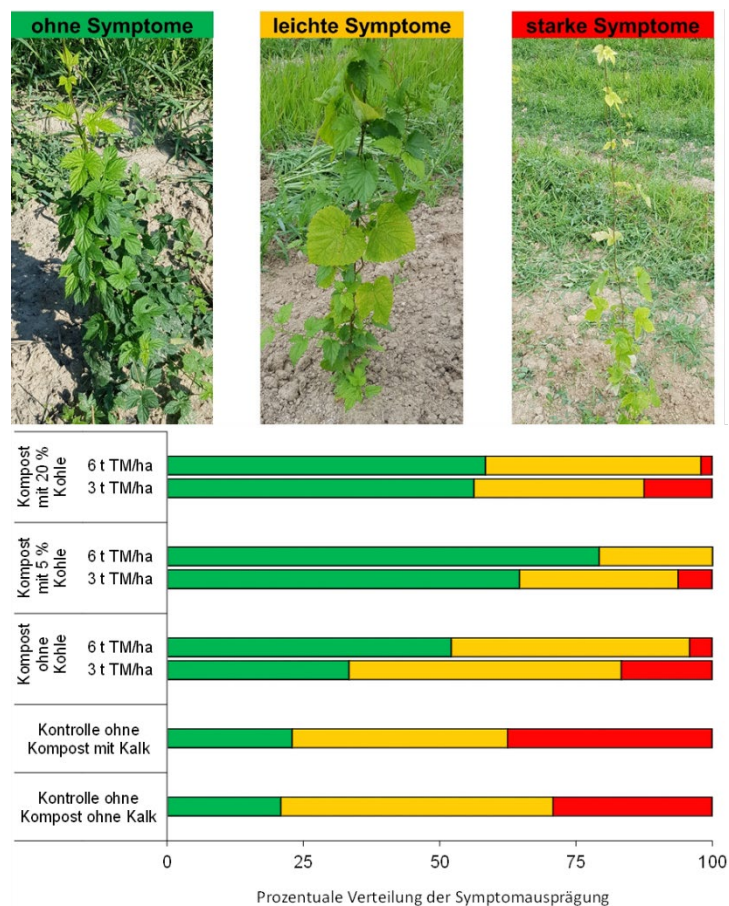


Abb. 8: Prozentuale Verteilung der Toxizitätssymptome 3 Wochen nach Pflanzung (BBCH 21-29) in Abhängigkeit von Kompostausbringung und Kalkung

Parallel zu den Bonituren wurden aus allen Varianten Blätter entnommen und auf ihre Kupfergehalte hin untersucht. Diese unterschieden sich aber nicht signifikant und lagen unabhängig von der Intensität der Chlorosen auf einem sehr niedrigen Niveau. Neben Kupfer wurden auch alle anderen Pflanzennährstoffe analysiert. Größere Unterschiede im Gehalt gab es nur beim Mangan, wobei die Werte zum Teil in Bereichen lagen, in denen toxischer Überschuss nicht ausgeschlossen werden kann. Allerdings konnte auch

beim Mangan kein eindeutiger Zusammenhang zwischen den Gehalten und der Intensität der Symptome festgestellt werden. Zudem ist unklar, wodurch die hohen Mangangehalte verursacht wurden. Eine Möglichkeit wäre, dass die eigentliche Ursache der Symptome latente Virose (Apfelmosaik-, Hopfenmosaik- oder Arabis-Mosaik-Virus) sind, die nur unter Stressbedingungen (v.a. Hitze und Trockenheit, aber vielleicht auch Kupfer- oder Manganüberschuss) symptomatisch werden. Durch die Kompostgabe könnte das Stresslevel gesenkt und dadurch die Ausprägung der Symptome reduziert werden. Diese Vermutung müsste aber in weiteren Untersuchungen verifiziert werden, genauso wie die Ursache für die hohen Mangangehalte.

Am Ende des zweiten Standjahres wurden zudem die Gesamtbiomasse sowie der Doldenertrag ermittelt. Die Pflanzenkohlekomposte verbesserten das Pflanzenwachstum sowohl im Vergleich zur ungekalkten als auch zur gekalkten Kontrolle in den meisten Fällen signifikant, ein positiver Effekt auf den Doldenertrag konnte dagegen nicht festgestellt werden (Abb. 9). Trotz Signifikanzen sollten die Unterschiede auf Grund der Heterogenität des Gesamtbestandes aber nicht überbewertet werden.

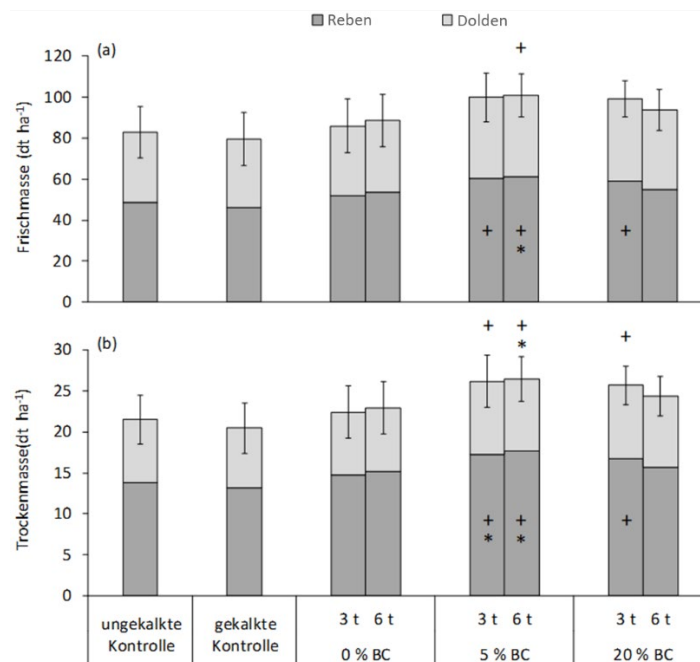


Abb. 9: Frisch- (a) und Trockenmasse (b) von Dolden und Reben (Asterisken bzw. Pluszeichen zeigen signifikante Unterschiede des Doldenertrags bzw. der Rebenbiomasse (Symbole innerhalb der Säulen) sowie der insgesamt gebildeten Frisch- und Trockenmasse (Symbole über den Säulen) zur ungekalkten (*) bzw. zur gekalkten Kontrolle (+); Dunett-Test mit $p \leq 0,05$, $n = 6$; Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler der Gesamtbiomasse)

3.2 Auswirkung von Pflanzenkohlekomposten auf das Bodenleben

Im Rahmen der Untersuchungen wurde zum einen das Vermeidungsverhalten von Regenwürmern und zum anderen die Aktivität der Bodenmikroorganismen anhand der Bodenatmung untersucht (Abb. 10). Wie bei den pflanzenbaulichen Versuchen wurden auch bei diesen Untersuchungen sowohl Böden aus Hopfengärten als auch gezielt mit Kupfer beaufschlagte Böden verwendet, wobei sich die Aufwandmengen an denen der pflanzenbaulichen Versuche orientierten.



Abb. 10: OxiTop-Messsystem zur Bestimmung der mikrobiellen Aktivität (links) sowie Prüfgefäß für den Regenwurmvermeidungstest mit einem Prüf- und einem Kontrollboden sowie den eingesetzten Regenwürmern (rechts)

Durch die Einbringung der Komposte konnte das Vermeidungsverhalten von Regenwürmern bei hohen Kupfergehalten eindeutig reduziert werden (Abb. 11). Die Wirkung basierte dabei auf einer Kombination der gesteigerten Lockwirkung durch die Einbringung der Komposte und der Reduktion der Kupferverfügbarkeit. Allerdings war ähnlich wie bei den pflanzenbaulichen Versuchen auch in diesem Fall der reine Komposteffekt deutlich stärker ausgeprägt als der Zusatzeffekt der Pflanzenkohle.

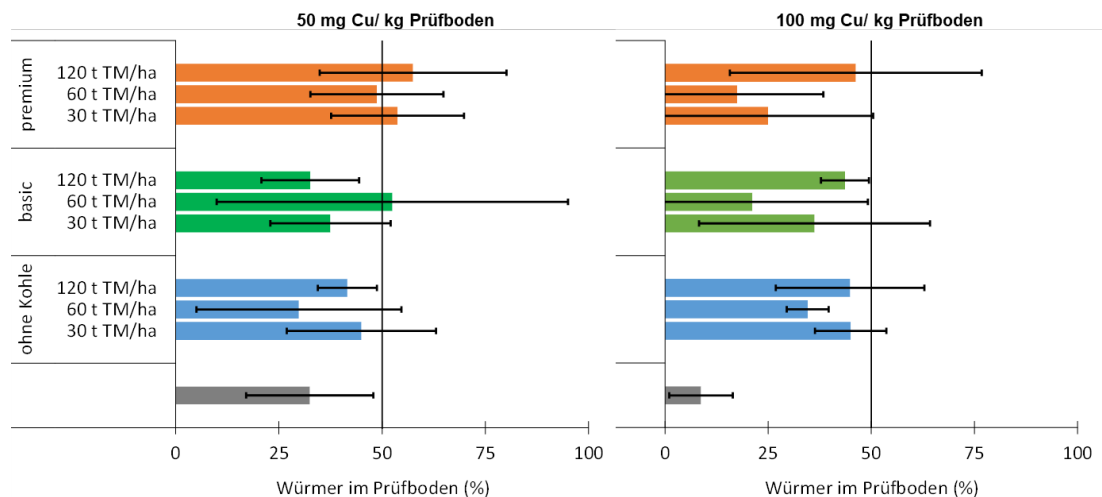


Abb. 11: Einfluss eines kohlefreien Komposts (ohne Kohle) bzw. zweier unterschiedlicher Pflanzenkohlekomposte (basic und premium; Kohleanteil 25 Vol.-%) auf das Vermeidungsverhalten von Regenwürmern bei einem Boden mit 50 bzw. 100 mg/kg Gesamtkupfer (Fehlerbalken zeigen die 95 % Vertrauensintervalle, Tukey-Test, $p < 0,05$)

Im Hinblick auf die mikrobielle Aktivität zeigten sich Komposte ohne Pflanzenkohle denen mit Pflanzenkohle sogar leicht überlegen, wenngleich auch hier der Unterschied zwischen Böden ohne Kompost und denen mit Kompost deutlich stärker ausgeprägt war als der Unterschied zwischen Böden mit unterschiedlichen Komposten. Ein Zusammenhang zur Kupferbelastung konnte dabei allerdings nicht festgestellt werden (Abb. 12). Die tendenziell leicht negative Wirkung von Pflanzenkohle ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass Pflanzenkohlekomposte – wie im Abschnitt 2.3 erläutert – einen höheren Anteil abbaustabiler Kohlenstoffverbindungen enthalten als Komposte ohne Pflanzenkohle.

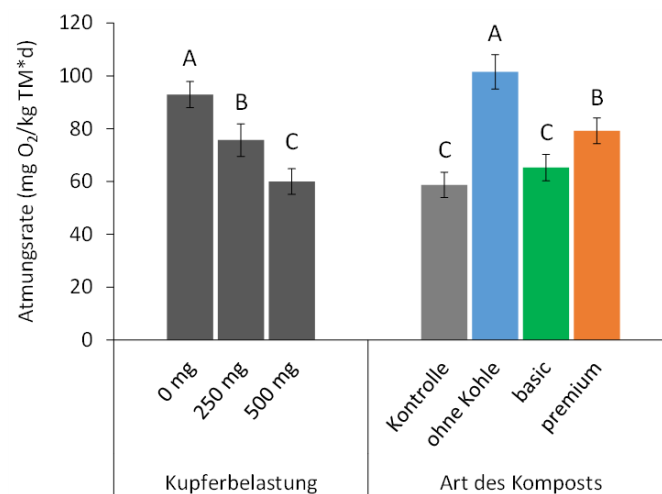


Abb. 12: Einfluss einer Kupferbelastung sowie der Zugabe eines kohlenfreien bzw. zweier Pflanzenkohlekomposte (basic und premium; Kohleanteil 25 Vol.-%) auf die Bodenatmung (Varianten mit gleichem Buchstaben innerhalb eines Säulenblocks unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey-Test, $p < 0,05$); Fehlerbalken zeigen Standardfehler)

Vergleichbare Effekte einer (Pflanzenkohle-)Kompostausbringung konnten in einem kupferbelasteten Hopfengarten zudem nur bis zum Ende des ersten Standjahres gefunden werden. Am Ende des zweiten Standjahres waren im Feld kaum noch Unterschiede zwischen dem Boden mit bzw. ohne Kompost (egal ob mit oder ohne Kohle) zu erkennen. In Anbetracht dessen und vor dem Hintergrund der punktuellen Ausbringung ist nicht von einer grundsätzlichen Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit durch die einmalige Ausbringung von (Pflanzenkohle-)komposten als Pflanzlochgabe auszugehen.

4 Handlungsempfehlungen für die Praxis

Durch die Applikation von Komposten in das Pflanzloch konnte das Anwachsverhalten von Junghopfen auf kupferbelasteten Böden signifikant verbessert werden. Ein zusätzlich positiver Effekt von Pflanzenkohle konnte dabei so gut wie nicht beobachtet werden. Allerdings sind relativ hohe Kompostgaben (2 bis 3 kg Trockenmasse) direkt ins Pflanzloch notwendig. Zudem ist die Erzeugung der Komposte mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden: So musste während der Kompostierung teilweise bis zu zehnmal umgesetzt werden, wobei es keinen großen Unterschied machte, ob Pflanzenkohlen eingemischt wurden oder nicht. Unter Berücksichtigung der hierfür notwendigen Arbeitszeit und der benötigten Technik (Schlepper mit Umsetzer) ist fraglich, ob der pflanzenbauliche Nutzen alleine diese Kosten wettmacht. Allerdings kann durch die Anwendung von Komposten auch Aufwand eingespart werden: So zeigte sich insbesondere bei einem der beiden durchgeführten Feldversuche, dass die Kompostapplikation die Pflanzung deutlich erleichterte. Zudem waren bewässerungstechnisch positive Effekte zu verzeichnen. Da es sich um ein Jahr mit ausgeprägter Frühjahrstrockenheit handelte, musste der Junghopfen nach der Pflanzung mehrfach bewässert werden. Bei den Varianten mit Kompostgabe versickerte dabei das Wasser wesentlich schneller im Pflanzloch als bei denen ohne. Dadurch konnte zum einen die für die Bewässerung notwendige Arbeitszeit deutlich reduziert und darüber hinaus Wasserverluste durch oberirdischen Abfluss verhindert werden. Durch die Steigerung der Wasserhaltekapazität des Bodens im Pflanzlochbereich entwickelten sich die Pflanzen mit Kompostgabe besser und schneller. Es gibt also gute Argumente für eine Kompostanwendung bei Pflanzung, ob sich diese rechnen muss allerdings einzelbetrieblich entschieden werden.

Aus pflanzenbaulicher Sicht macht der Einsatz von Pflanzenkohle wenig Sinn. Allerdings kann der Kompostierprozess positiv beeinflusst werden. Durch die Verlängerung

bzw. Intensivierung der thermophilen Phase wird eine bessere Hygienisierung des Materials erreicht, was vor dem Hintergrund einer möglichen Verbreitung von Krankheitserregern bei der Rückführung von infiziertem Rebenhäckselmaterial ein ganz wesentlicher Aspekt ist. Demgegenüber stehen die Kosten für die Beschaffung der Pflanzenkohle. Bei den derzeit üblichen Preisen von rund 800 € je Tonne bedeutet eine Beimischung von 5 Vol.-% Mehrkosten von 350 bis 400 € je Tonne des fertigen Komposts. Je Hektar entspricht dies bei 2,5 kg Komposttrockenmasse je Pflanzloch und 2.400 Pflanzen je Hektar zwischen 2.000 und 2.500 €. Auch hier können – wie bei der Kompostanwendung an sich – keine allgemeinen Empfehlungen gegeben werden. Vielmehr muss jeder Betrieb für sich entscheiden, ob ihm die Risikominderung das wert ist.

5 Verzeichnisse

5.1 Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

Tab. 1: Physikalische und chemische Eigenschaften der aus Hopfenrebenhäckseln hergestellten Komposte ohne (0 % BC) sowie mit 5 bzw. 20 Vol.-% Pflanzenkohle (offene Mietenkompostierung).....	8
Abb. 1: Logo des europäischen Pflanzenkohle-Zertifikats (EBC: European Biochar Certificate).....	5
Abb. 2: Starke Staubentwicklung beim Aufsetzen einer Pflanzenkohlekompostmiete mit einer zu trockenen Pflanzenkohle	6
Abb. 3: Verlauf der Mientemperatur während der Kompostierung von Hopfenrebenhäcksel ohne (0 Vol.-% Kohle) sowie mit zwei Mengen an Pflanzenkohle (5 bzw. 20 Vol.-% Kohle). Vertikale Linien kennzeichnen die Umsetzzeitpunkte. Fehlerbalken zeigen den Standardfehler	7
Abb. 4: Kompost ohne Kohle (a) und mit 5 (b) bzw. 20 Vol.-% Pflanzenkohle (c) nach Abschluss des Kompostierprozesses	8
Abb. 5: Thermisch-pyrolytische Fraktionierung des in Pflanzenkohlekomposten (Basis, TFK, BAK bezeichnen unterschiedliche Pflanzenkohlen, die Zahlen kennzeichnen den volumemäßigen Anteil am Ausgangsmaterial) enthaltenen organischen Kohlenstoffs zwischen 250 und 1000 °C unter einer N ₂ -Atmosphäre (die Zahl über den Säulen kennzeichnet den Prozentsatz des unter pyrolytischen Bedingungen insgesamt freigesetzten Kohlenstoffs bezogen auf den Gesamt-C _{org} der Proben).....	9
Abb. 6: Pflanzlochnahe Ausbringung von Pflanzenkohle bei der Pflanzung von Hopfenfechtern (2,5 kg Trockenmasse je Pflanzloch ≈ 60 t/ha).....	10

- Abb. 7: Wachstum von Chinakohl in einem Boden mit steigender Kupferbelastung ohne Kompost sowie mit einem kohlefreien Kompost (0 Vol.-% Kohle) und zwei Pflanzenkohlekomposten (5 und 20 Vol.-% Kohle)..... 11
- Abb. 8: Prozentuale Verteilung der Toxizitätssymptome 3 Wochen nach Pflanzung (BBCH 21-29) in Abhängigkeit von Kompostausbringung und Kalkung..... 12
- Abb. 9: Frisch- (a) und Trockenmasse (b) von Dolden und Reben (Asterisken bzw. Pluszeichen zeigen signifikante Unterschiede des Doldenertrags bzw. der Rebenbiomasse (Symbole innerhalb der Säulen) sowie der insgesamt gebildeten Frisch- und Trockenmasse (Symbole über den Säulen) zur ungekalkten (*) bzw. zur gekalkten Kontrolle (+); Dunett-Test mit $p \leq 0,05$, $n = 6$; Fehlerbalken kennzeichnen den Standardfehler der Gesamtbiomasse)..... 13
- Abb. 10: OxiTop-Messsystem zur Bestimmung der mikrobiellen Aktivität (links) sowie Prüfgefäß für den Regenwurmvermeidungstest mit einem Prüf- und einem Kontrollboden sowie den eingesetzten Regenwürmern (rechts) 14
- Abb. 11: Einfluss eines kohlefreien Komposts (ohne Kohle) bzw. zweier unterschiedlicher Pflanzenkohlekomposte (basic und premium; Kohleanteil 25 Vol.-%) auf das Vermeidungsverhalten von Regenwürmern bei einem Boden mit 50 bzw. 100 mg/kg Gesamtkupfer (Fehlerbalken zeigen die 95 % Vertrauensintervalle, Tukey-Test, $p < 0,05$)..... 15
- Abb. 12: Einfluss einer Kupferbelastung sowie der Zugabe eines kohlenfreien bzw. zweier Pflanzenkohlekomposte (basic und premium; Kohleanteil 25 Vol.-%) auf die Bodenatmung (Varianten mit gleichem Buchstaben innerhalb eines Säulenblocks unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey-Test, $p < 0,05$); Fehlerbalken zeigen Standardfehler) 15

5.2 Quellenverzeichnis

- Kühne, S., Strassemeyer, J., Roßberg, D. (2009). Anwendung kupferhaltiger Pflanzenschutzmittel in Deutschland. *Journal für Kulturpflanzen* 61(4), 126-130.
- Luskar, L., Polanšek, J., Hladnik, A., & Čeh, B. (2022). On-farm composting of hop plant green waste – Chemical and biological value of compost. *Applied Sciences*, 12(9), 4190.
- Rizwan, M., Ali, S., Qayyum, M.F., Ibrahim, M., Zia-ur-Rehman, M., Abbas, T., Ok, Y.S. (2016). Mechanisms of biochar-mediated alleviation of toxicity of trace elements in plants: a critical review. *Environmental Science and Pollution Research* 23(3), 2230-2248.
- Strumpf, T., Engelhard, B., Weihrauch, F., Riepert, F., Steindl, A. (2011). Erhebung von Kupfergesamtgehalten in ökologisch und konventionell bewirtschafteten Böden.

Teil 2: Gesamtgehalte in Böden deutscher Hopfenanbaugebiete. *Journal für Kulturpflanzen* 63(5), 144-155.

- Wang, J., Shi, L., Zhai, L., Zhang, H., Wang, S., Zou, J., Shen, Z., Lian, C., Chen, Y. (2021). Analysis of the long-term effectiveness of biochar immobilization remediation on heavy metal contaminated soil and the potential environmental factors weakening the remediation effect: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 207, 111261.
- Wu, H., Lai, C., Zeng, G., Liang, J., Chen, J., Xu, J., Dai, J., Li, X., Liu, J., Chen, M., Lu, L., Hu, L., Wan, J. (2017a). The interactions of composting and biochar and their implications for soil amendment and pollution remediation: a review. *Critical Reviews in Biotechnology* 37(6), 754-764.
- Wu, S., He, H., Inthapanya, X., Yang, C., Lu, L., Zeng, G., Han, Z. (2017b). Role of biochar on composting of organic wastes and remediation of contaminated soils — a review. *Environmental Science and Pollution Research* 24(20), 16560-16577.
- Xie, T., Reddy, K.R., Wang, C., Yargicoglu, E., Spokas, K. (2015). Characteristics and applications of biochar for environmental remediation: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 45(9), 939-969.
- Zhu, X., Chen, B., Zhu, L., Xing, B. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: a review. *Environmental Pollution* 227, 98-115.