

Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle

Hans-Peter Schmidt^{1}, Claudia Kammann², Nikolas Hagemann^{1,3}*

¹ Ithaka Institute, Ancienne Eglise 9, 1974 Arbaz, Switzerland

² Department of Applied Ecology, Hochschule Geisenheim University, Von-Lade-Str. 1, 65366 Geisenheim, Germany

³ Agroscope, Environmental Analytics, Reckenholzstrasse 191, 8046 Zurich, Switzerland

*corresponding author: schmidt@ithaka-institut.org

Zitationsweise:

EBC (2020), Zertifizierung des C-Senken Potentials von Pflanzenkohle, Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. (<http://european-biochar.org>). Version 1.0E of 1st June 2020

1. Grundlagen

Pflanzliche Biomasse besteht zu ca. 50% aus Kohlenstoff, den die Pflanze durch ihr Wachstum der Atmosphäre in Form von CO₂ entzogen hat. Mittels der Energie des Sonnenlichts wird das C von dem aufgenommenen CO₂ abgetrennt und damit in mehreren Schritten in organische Moleküle wie z.B. Glukose, Zellulose oder Lignin aufbaut.

Wird pflanzliche Biomasse pyrolysiert, entweichen die leicht flüchtigen Kohlenstoffverbindungen der Biomasse als brennbares Gas, während die nichtflüchtigen Kohlenstoffe der Biomasse neue aromatische Cluster (d.h. Pflanzenkohle) bilden. Diese in der Pyrolyse neu geschaffenen Verbindungen des einst aus der Atmosphäre entzogenen Kohlenstoffs sind äußerst stabil und werden unter natürlichen Bedingungen nur sehr langsam biologisch oder chemisch abgebaut. Sofern die Pflanzenkohle nicht verbrannt wird, bleibt der Kohlenstoff der Pflanzenkohle über mehrere Jahrhunderte im terrestrischen System erhalten und stellt somit eine terrestrische Kohlenstoffsенke (C-Senke) dar.

Wird die Pflanzenkohle direkt in Böden eingebracht oder gelangt sie über die Applikation im Tierfutter, in der Stalleinstreu, in der Gülle, im Kompost oder in Biogasanlagen indirekt in landwirtschaftliche Böden, lässt sich nach bisherigen Erkenntnissen eine durchschnittliche Abbaurate von 0,3% pro Jahr annehmen (Camps-Arbestain et al., 2015). 100 Jahre nach einer Bodenapplikation wären folglich noch 74% des ursprünglichen Kohlenstoffs der Pflanzenkohle gespeichert. Es handelt sich hierbei um eine sehr konservative Hochrechnung, andere Quellen ermittelten je nach Pyrolysegrad und Versuchsanordnung deutlich geringere Abbauraten (Kuzyakov, Bogomolova & Glaser, 2014; Lehmann et al., 2015). In Ermangelung verlässlicherer Methoden und Langzeitversuche ist es allerdings

unausweichlich, auf konservative Hochrechnungen zurückzugreifen und die klimarelevante Wirkung von C-Senken mit ausreichender Sicherheitsmarge zu berechnen.

Wird die Pflanzenkohle in Baumaterialien als Sandersatz oder als Zusatz in Asphalt und Kunststoffen eingesetzt, so kann auch davon ausgegangen werden, dass die Pflanzenkohle so lange stabil ist und als C-Senke erhalten bleibt, wie das Material an sich Bestand hat. Erst

C-neutral: Ein System ist C-neutral, wenn es über einen definierten Zeitraum (Referenzzeitraum) eben soviel Kohlenstoff aus der Atmosphäre aufnimmt wie es wieder abgibt. Die im System gespeicherte Menge Kohlenstoff bleibt also konstant. Als System gilt hier zum Beispiel ein Wald oder eine landwirtschaftliche Fläche oder auch eine gesamte Region mit Städten, Wäldern, Mooren, Seen und landwirtschaftlichen Flächen.

Klimaneutral: Ein System gilt als klimaneutral, wenn es über einen Referenzzeitraum keinerlei globale Erwärmung bewirkt. Die Summe aller vom System ausgestoßenen Treibhausgase (CO₂, CH₄, N₂O u.a.) ist ebenso groß wie der Entzug von Treibhausgasen aus der Atmosphäre. Die Menge der emittierten oder entzogenen Treibhausgase erfolgt jeweils in CO₂-Äquivalenten (CO₂eq).

Klimapositiv: Ein System gilt als klimapositiv, wenn der Atmosphäre über einen Referenzzeitraum mehr CO₂-Äquivalente (CO₂eq) entzogen als wieder in die Atmosphäre emittiert wurden. Ein klimapositives System trägt während des Referenzzeitraums zur Reduktion der globalen Klimaerwärmung bei.

Klimanegativ: Ein System gilt als klimanegativ, wenn über einen Referenzzeitraum dessen gesamter Ausstoß an Treibhausgasen größer ist als der Entzug von CO₂-Äquivalenten aus der Atmosphäre. Das System trägt zur globalen Klimaerwärmung bei.

Im Kontext der C-Senken Wirtschaft ist die Verwendung der Begriffe C-negativ, C-positiv und Negativemissionen verwirrend, da hierbei die Atmosphäre als Bezugsgröße gesetzt wird und die Beurteilung als «negativ» sich auf den Entzug (= minus) von CO₂ aus der Atmosphäre bezieht. C-positiv wäre also ein System, das dafür sorgt, dass der CO₂-Gehalt in der Atmosphäre zunimmt, obwohl dies aus Sicht des Klimaschutzes natürlich als negativ anzusehen wäre. Zur Vermeidung etwaiger Missverständnisse nutzen die EBC-Richtlinien die Begriffe C-neutral, klimapositiv und klimanegativ.

wenn das pflanzenkohlehaltige Material entsorgt, zerstört oder zurückgebaut wird, kann der so gespeicherte Kohlenstoff verloren gehen, womit die C-Senke ihren Wert verliert und aus dem entsprechenden Register auszutragen wäre.

Bei allen Varianten der Pflanzenkohle-Anwendung muss stets bedacht werden, dass durch die Pflanzung der Biomasse, deren Ernte, Transport, Zerkleinerung, Pyrolyse, Pyrogasverbrennung, Vermahlung, Mischung und Boden- oder Materialeinbringung Treibhausgasemissionen verursacht werden, die in der Gesamtbilanz nicht vernachlässigt werden dürfen. Es genügt also nicht, wie oft noch üblich, nur den Kohlenstoffgehalt der Pflanzenkohle für den Wert der C-Senke anzusetzen.

1.1 Definition und Berechnung des C-Senken Potentials

Verlässt eine Verpackungseinheit Pflanzenkohle (z.B. ein Bigbag oder Container) den Ort ihrer Herstellung, so stellt die Pflanzenkohle noch keine zertifizierte C-Senke dar, sondern besitzt lediglich das Potential, eine zertifizierte C-Senke zu werden. Wie groß dieses C-Senken Potential ist, wird im Rahmen der EBC-Zertifizierung berechnet.

Die ausgelieferte Pflanzenkohle könnte von einem Feuer ergriffen werden, oder ein Kunde kauft sie zur Co-Feuerung in einem Biomassekraftwerk oder als Oxidationsmittel für die Stahlherstellung. In allen diesen Fällen würde der Kohlenstoff wieder als CO₂ in die Atmosphäre entweichen, womit die C-Senke aufgelöst werden würde.

Zu einer langfristigen und also solche zertifizierbaren C-Senke wird die Pflanzenkohle erst ab dem Moment, wo sie nicht mehr verbrennen kann. Erst wenn Pflanzenkohle über die Einmischung in Tierfutter, als Stalleinstreu, als Kompostzusatz oder als Teil ähnlicher Substrate schließlich in den Boden gelangt oder wenn sie zum Bestandteil von Beton oder ähnlichen, nicht brennbaren Verbundmaterialien wird, dann kann sie als langfristige terrestrische C-Senke mit mathematisch definierbaren Abbauraten angesehen werden. Bis zu diesem entscheidenden Zeitpunkt, wo der Kohlenstoff der Pflanzenkohle in einen langfristigen und definierbaren Lebenszyklus eintritt, besitzt der Kohlenstoff der Pflanzenkohle lediglich ein C-Senken Potential.

Das C-Senken Potential von Pflanzenkohle ergibt sich aus dem Kohlenstoffgehalt der Pflanzenkohle abzüglich aller durch ihre Herstellung und Verwertung verursachten Emissionen.

Das C-Senken Potential errechnet sich wie folgt:

- 1) Der Kohlenstoffgehalt der Pflanzenkohle wird nach EBC Methodik ermittelt und gibt den in der Pflanzenkohle gespeicherten Kohlenstoff in Massenprozent der Trockensubstanz an.
- 2) Alle durch die Bereitstellung der Biomasse bedingten Treibhausgas-Emissionen werden für die gesamte Produktionscharge in CO₂eq erfasst.
- 3) Alle Treibhausgas-Emissionen, die durch die Pyrolyseanlage und die nachfolgende Verarbeitung der Pflanzenkohle verursacht werden, werden für die gesamte Charge in CO₂eq erfasst.
- 4) Über den Faktor 0,2727 (Verhältnis der Atommasse von Kohlenstoff und der Molekülmasse von Kohlenstoffdioxid = $12 \text{ u} / 44 \text{ u} = 0,2727$) wird die ermittelte Gesamtmenge an CO₂eq in atomaren Kohlenstoff umgerechnet und ergibt den Kohlenstoffaufwand. Der Kohlenstoffaufwand einer Produktionscharge gibt an, wie viel Kohlenstoff als CO₂ emittiert wurde, um die Gesamtmenge an Pflanzenkohle einer Produktionscharge herzustellen.

- 5) Der Kohlenstoffaufwand wird in Massenprozent bezogen auf das Trockengewicht der Pflanzenkohle angegeben. Dieser berechnet sich, indem der Kohlenstoffaufwand durch das Trockengewicht der Gesamtproduktionsmenge Pflanzenkohle geteilt wird.
- 6) Der prozentuale Kohlenstoffaufwand wird vom Kohlenstoff-Gehalt der Pflanzenkohle abgezogen, woraus sich das C-Senken Potential in Massenprozent der Pflanzenkohle (TS) ergibt.

Das EBC-Senken-Zertifikat bilanziert somit den vollständigen CO₂-Fußabdruck der Pflanzenkohle vom Ursprung der Biomasse bis zum Verlassen des Betriebsgeländes, auf dem die EBC zertifizierte Pyrolyseanlage betrieben wird. Das C-Senken Potential gibt an, welcher Gewichtsanteil einer gegebenen Menge Pflanzenkohle in eine langfristige C-Senke umgewandelt werden kann. Konkrete Berechnungsbeispiele finden sich weiter unten in zwei farblich unterlegten Kästen.

1.2 Definition der C-Neutralität des Biomasse-Inputmaterials

Das übergreifende Ziel der C-Senken-Zertifizierung ist es, die Gesamtmenge an Kohlenstoff, die in der Biosphäre und Geosphäre gespeichert ist, zu erhöhen und damit die Konzentration von Treibhausgasen in der Atmosphäre zu reduzieren. Daher ist bei der Zertifizierung von C-Senken sicherzustellen, dass die zertifizierte C-Senke nicht auf Kosten einer anderen C-Senke der Biosphäre oder Geosphäre entsteht. Die Kohlenstoffneutralität einer Biomasse wird wie folgt definiert:

Ein Ausgangsmaterial (Biomasse) für die Generierung einer C-Senke ist C-neutral, wenn es sich entweder um den Reststoff einer Biomasse-Verarbeitung handelt oder wenn im Referenzzeitraum der gesamte Kohlenstoffvorrat des Systems, in dem die Biomasse gewachsen ist, durch deren Entnahme nicht sinkt.

Pflanzenkohle, die aus Biomassen hergestellt wurde, welche aus der Zerstörung oder dem Abbau einer natürlichen C-Senke stammt oder die zum Schwinden einer bereits vorhandenen Senke beiträgt, hat keinen C-Senkenwert und kann nicht als Klimadienleistung anerkannt werden.

Für die Berechnung und Zertifizierung des EBC C-Senken Potentials werden nur C-neutrale Biomasse-Inputmaterialien zugelassen.

Das Beispiel vom einzelnen Baum

Wird der letzte Baum einer Insel gefällt, gehäckselt und in einer Pyrolyseanlage zu Pflanzkohle verarbeitet, gehen mehr als 50% desjenigen Kohlenstoffs verloren, der ursprünglich im lebenden Baum gespeichert war. Kohlenstoffneutral wäre dieses System aus Biomasseproduktion und Pyrolyse erst, wenn ein neuer Baum ebenso viel Kohlenstoff aus der Atmosphäre entzogen hätte, wie in der Verarbeitung zu Pflanzkohle verloren gegangen war.

Pflanzkohle kann also nur dann eine klimapositive Wirkung erzielen, wenn die Produktion der Biomasse, die für die Herstellung von Pflanzkohle verwendet wurde, zumindest kohlenstoffneutral ist. Das heißt, **erst wenn die Biomasse dort, wo sie geerntet wurde, wieder nachgewachsen ist, kann die Pflanzkohle, die daraus erzeugt wurde, als Kohlenstoffsenke anerkannt werden.** Dies ist eine der wesentlichen Grundlagen der EBC-Zertifizierung des C-Senken Potentials.

Das Beispiel einer Miscanthus-Plantage

Pflanzt man einen Hektar *Miscanthus*-Gras auf einem Teil einer mit einjährigen Kulturen bestellten Ackerfläche, erntet dieses nach einigen Monaten und verbrennt es zur Energieerzeugung, so entspricht die Menge des bei der Verbrennung erzeugten CO₂ genau der Menge, die das geerntete *Miscanthus*-Gras während seines Wachstums aus der Atmosphäre entzogen hatte. Die Biomasse kann somit als C-neutral angesehen werden. Wird das *Miscanthus*-Gras nicht verbrannt, sondern pyrolysiert, bleibt die Hälfte des vom Gras aufgenommenen Kohlenstoffs in der Pflanzkohle enthalten, womit das System nicht nur neutral, sondern klimapositiv wäre. Diese Pflanzkohle aus dem innerhalb von weniger als einem Jahr nachwachsenden *Miscanthus* ist, solange sie erhalten bleibt, eine zusätzliche C-Senke.

2. Biomassekategorien

Für die C-Senken-Zertifizierung sind nur Pflanzkohlen zugelassen, die entweder aus Reststoffen oder aus anderweitig C-neutral bereitgestellten Biomassen hergestellt wurden. Im Detail ergeben sich daraus je nach genauem Ursprung der Biomasse die spezifischen Anforderungen für die folgenden sechs Biomassekategorien:

2.1 Landwirtschaftliche Biomassen

Werden einjährige Biomassen auf landwirtschaftlichen Flächen speziell zur pyrolytischen und/oder energetischen Nutzung angebaut (siehe Beispiel im farbigen Kasten oben), so kann davon ausgegangen werden, dass auf der gleichen Fläche spätestens nach einem Jahr die etwa gleiche Menge an Biomasse nachgewachsen sein wird, womit der Atmosphäre die

in etwa gleiche Menge an CO₂ erneut entzogen werden wird. Die geerntete Biomasse kann somit auf der Bezugsbasis von einem Jahr (Referenzzeitraum) als C-neutral angesehen werden, so dass aus dem Teil, der durch Pyrolyse zu Pflanzenkohle verarbeitet wurde, eine C-Senke entstehen kann.

Die Anlage von Misch- und Dauerkulturen sowie von Ackerforst und Wiesen, die zusätzlich zur Biomasseproduktion den Humusaufbau fördern, sind gegenüber der Kultivierung von Monokulturen zur Biomasseerzeugung zu bevorzugen. Grundsätzlich sollte Biomasse als vollwertiges landwirtschaftliches Teilprodukt («Kohlenstofferte») anerkannt werden. Die landwirtschaftliche Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln ließe sich somit hervorragend mit der Produktion von Biomasse kombinieren. Damit ließe sich nicht nur die landwirtschaftliche Produktivität, sondern auch die Biodiversität, der Humusgehalt der Böden und der dauerhafte Entzug von CO₂ aus der Atmosphäre steigern.

Mit der Einbeziehung von Biomassen als vollwertiges Produkt der Landwirtschaft würde sich auch die Definition von landwirtschaftlichen Reststoffen ändern. Stroh, Tomaten- und Kartoffelkraut, Kohlstängel und -blätter, Reb-, Hopfen- und Baumschnitt stellen einen essentieller Bestandteil **der landwirtschaftlichen Kohlenstofferte** dar. Das Trockengewicht dieser Biomassen besteht ebenso zu 50 % aus Kohlenstoff. Mittels Pyrolyse kann über die Hälfte dessen in dauerhafte C-Senken umgewandelt werden, anstatt wie bisher noch üblich durch Verrottung oder gar Verbrennung in vergleichsweise kurzer Zeit wieder vollständig zu CO₂ umgesetzt zu werden. Es wären vollwertige Produkte des Klimafarmings und ein Schlüssel für die Begrenzung des Klimawandels. Es geht hierbei freilich nicht darum, Erntereste komplett vom Feld zu entfernen und damit die wichtige ökologische Funktion der Bodenbedeckung und des für den Humuserhalt so wichtigen biologischen Nährstoffrecyclings zu unterbinden. Ziel ist es vielmehr, Biomasse unter Bewahrung dieser zentralen ökologischen Funktionen als landwirtschaftliches Produkt in den Bewirtschaftungsplan einzubeziehen.

Sämtliche landwirtschaftliche Biomassen gelten als C-neutrales Inputmaterial. Es muss allerdings sichergestellt sein, dass es durch den Entzug von Ernterückständen nicht zu einer Abnahme des Bodenkohlenstoffvorrats kommt. Erfolgte zur Erzeugung der Biomasse eine mineralische N-Düngung, muss deren Klimabilanz nach der Formel $100 \text{ kg N} = 1 \text{ t CO}_2\text{eq}$ (Zhang et al., 2013) vom C-Senkenwert abgezogen werden. Der Einsatz-Aufwand von Treibstoffen für Anbau und Ernte muss mit einem Umrechnungsfaktor von $3,2 \text{ kg CO}_2\text{eq} / \text{l Diesel}$ (Jührich, 2016) ebenfalls vom C-Senken Potential abgezogen werden.

2.2 Organische Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung

Trester, Nussschalen, Obstkerne, Kaffeesatz und andere organische Reststoffe aus der Lebensmittelverarbeitung gelten als C-neutrale Inputmaterialien, denn die CO₂-Bilanz der

Lebensmittelherstellung ist auf die Herstellung der Primärprodukte (z.B. Wein, Olivenöl, Obstsaft, Kaffee) anzurechnen.

Beispiel zur Berechnung des Kohlenstoff-Aufwands für die Bereitstellung der Biomasse

- Es werden auf einem Hektar 10 t Biomasse unter Einsatz von 50 kg N und 25 l Diesel erzeugt, die zu 3 t Pflanzkohle (Trockensubstanz = TS) mit einem Kohlenstoffgehalt von 75% verarbeitet werden.
- Der Kohlenstoffaufwand beträgt 0,5 t CO₂eq für die Düngung und 0,08 t CO₂eq für den verbrauchten Diesel (3,2 kg * 25 l). Dies ergibt 0,58 t CO₂eq (0,16 t C).
- Die Erzeugung von 3 t Pflanzkohle verbraucht für die Biomassebereitstellung 0,16 t C, was 5,3 Massenprozent (bezogen auf die Trockensubstanz der Pflanzkohle) entspricht.
- Vorbehaltlich des Abzugs weiterer, durch die Pyrolyse und Nachbehandlung bedingter Emissionen (vgl. unten), beträgt das C-Senken Potential folglich $75\% - 5,3\% = 69,7\%$.

2.3 Holz aus Landschaftspflege, Kurzumtriebsplantagen, Ackerforstwirtschaft, Waldgärten, Feldrainen und urbanen Flächen

Werden Bäume oder Hecken auf landwirtschaftlichen Flächen nur verschnitten oder eingekürzt, nicht aber gefällt und wachsen somit aus den eigenen Wurzeln nach, gilt die so geerntete Biomasse als C-neutral. Biomassen aus naturschutzfachlicher Landschaftspflege, von Straßenbegleitgrün und von urbanen Flächen gelten ebenfalls als C-neutral.

Für das Schlagen von Bäumen in Waldgärten und Ackerforstwirtschaft gilt ebenso wie für Wälder, dass die kohlenstoffbewahrende Transformation eines Baumes erst dann als C-Senke gilt, wenn der gefällte Baum wieder nachgewachsen ist. Bäume von Streuobstwiesen, Baumstreifen und Wallhecken zur Ackerbegrenzung sind oft viele Jahrzehnte alt und müssen so erneuert werden, dass der auf die Flächeneinheit bezogene Holzentzug nicht die Menge des jährlichen Nachwuchses übertrifft.

Sofern Bäume auf einer landwirtschaftlich katastrierten und genutzten Fläche zum Zweck der Biomasseproduktion neu gepflanzt wurden (z.B. Kurzumtriebsplantagen oder Ackerforst), so kann die geerntete Biomasse bereits zum Erntezeitpunkt als C-neutral angesehen werden. Es muss allerdings garantiert sein, dass auf der entsprechenden Fläche die Biomasseproduktion durch Neupflanzung oder bereits erfolgte Verjüngung aufrecht erhalten bleibt.

Wenn zur Erzeugung der Biomasse mineralische N-Düngung erfolgte, muss deren Klimabilanz nach der Formel $100 \text{ kg N} = 1 \text{ t CO}_2\text{eq}$ (Zhang et al., 2013) vom C-Senken

Potential abgezogen werden. Der Aufwand für Anbau und Ernte inkl. des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln und Treibstoffen muss ebenfalls vom C-Senken-Wert abgezogen werden (3,2 kg CO₂eq / l Diesel (Juhrich, 2016)).

2.4 Biomasse aus der Waldbewirtschaftung

Ein Wald wird als eine Flächeneinheit mit einem Überschirmungsgrad (Baumkronendichte, eng. forest canopy density) von über 75% angesehen. Für eine effiziente Kontrolle des nachhaltigen Waldaufwuchses sollten die Flächeneinheiten 100 ha nicht überschreiten. Für den Aufbau von C-Senken durch Waldholzverarbeitung darf die Gesamtbiomasse eines bestehenden Wirtschaftswaldes pro Flächeneinheit von max. 100 ha nicht abnehmen. Der Holzentzug muss also mindestens durch den Nachwuchs an Waldholz auf der referenzierten Flächeneinheit kompensiert werden. Dem Wald sollte zudem nur maximal 80% der geernteten Biomasse entzogen werden, um den Nährstoffkreislauf und die Biodiversität des Waldes zu erhalten. Durch die Holzernte darf der Überschirmungsgrad nicht unter 75% sinken.

Beträgt also zum Beispiel der Nachwuchs eines 100 ha Fichtenwaldes 650 t (Trockensubstanz = TS) pro Jahr, so sollten auch nur maximal 650 t TS pro Jahr gefällt und davon maximal 520 t TS (80%) dem Wald zur Holznutzung entzogen werden.

In der europäischen Forstwirtschaft besteht derzeit noch keine flächendeckende Walderfassung in Flächeneinheiten von < 100 ha. Die Flächeneinheiten sind deutlich größer als 10.000 ha und der regionale Nachwuchs an Wald wird über Durchschnittswerte von Referenzflächen hochgerechnet. Sofern in Regionalwäldern wie z.B. Schwarzwald oder Arlberg der Nachwuchs des Waldes höher als der Entzug ist, wird die entzogene Biomasse nach der Europäischen Verordnung [2018/841] (EU-Parlament, 2018) als klimaneutral angesehen. Ökologisch ist es als kritisch zu betrachten, dass z.B. ein sich verdichtender Bergwald einen Kahlschlag im besser zugänglichen Tal kompensieren darf. **Bis zur Reform der LULUCF-Verordnung der EU (EU-Parlament, 2018), wird alles Holz aus Wäldern, deren Nachwuchs den Entzug nachweislich übertrifft, als C-neutraler Input für die EBC Zertifizierung des C-Senken Potentials anerkannt.**

Wir möchten diese Entscheidung, uns an die Europäische Gesetzgebung zu halten, vor allem damit begründen, dass es für die Entwicklung der C-Senken-Ökonomie nicht sinnvoll ist, die Restriktionen von Beginn an zu streng und idealistisch zu fassen. Wenn die EU-Staaten Bioenergie als klimaneutral fördern und sich den Nachwuchs ihrer Wälder als C-Senke anrechnen lassen, steht es uns nicht an, die gleiche Biomasse als nicht klimaneutral einzustufen. Trotzdem ist es unsere Überzeugung, dass Wälder und Waldholz in Zukunft effizienter als durch Pyrolyse und Vergasung für die Erzeugung von C-Senken genutzt werden sollten (Song et al., 2018). Der EBC-Standard wird hinsichtlich der Waldholznutzung

den technischen Möglichkeiten und politischen Gegebenheiten im Laufe der kommenden Jahre angepasst werden.

Ist die Klimaneutralität eines Waldes nicht durch die Berichte des betreffenden EU-Mitgliedsstaats oder durch sonstige regionale Gesetzgebung in vergleichbarer Weise sichergestellt, kann ein Nachweis auch durch PEFC oder FSC Zertifizierung erbracht werden. Andernfalls wird das Waldholz nicht als Biomasse-Input für die Herstellung von EBC zertifizierter Pflanzenkohle akzeptiert. Dementsprechend kann auch kein EBC C-Senken Potential von Pflanzenkohle aus diesen Biomassen zertifiziert werden.

Werden bei der Neuanlage von Wäldern zunächst dichtere Bestände gepflanzt und diese im Maße des Aufwuchses nach und nach ausgelichtet, so gilt das so entnommene Holz als C-neutraler Input, da durch diese Maßnahme der Aufwuchs der verbleibenden Bäume beschleunigt wird und die Gesamtakkumulation an Kohlenstoff zunimmt.

Der CO₂eq-Aufwand für die Holzernte muss vom C-Senken Potential abgezogen werden. Der dafür benötigte Aufwand an Dieseldieselkraftstoff wird mit dem Umrechnungsfaktor von 3,2 kg CO₂eq / l Diesel berechnet (Juhrich, 2016).

Es wird davon ausgegangen, dass keine Düngung im Wald erfolgt, andernfalls müsste der CO₂eq-Aufwand für Düngung und etwaige Kalkung) vom C-Senken Potential abgezogen werden.

2.5 Holzabfälle

Holzabfälle aus der Forstwirtschaft (z.B. Rinde, Kronen, Äste, Wurzeln), der Holzverarbeitung (z.B. Sägespäne, Verschnitt) sowie rezykliertes Bau- und Nutzholz (z.B. Verschalungen, Paletten, Möbel) gelten als C-neutral. Streng genommen müsste zwar auch bei diesen Holzabfällen sichergestellt werden, dass das für diese Materialien und Abfälle verwendete Holz ursprünglich aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammt, doch ist hier in der Regel keine Rückverfolgbarkeit mehr möglich. Zudem ist es natürlich besser, wenn die Holzabfälle zum Aufbau von C-Senken genutzt werden, anstatt sie zu verbrennen.

2.6 Sonstige biogene Reststoffe

Für die sonstigen auf der EBC-Positivliste geführten Biomassen kann in der Regel von einem C-neutralen Ausgangswert ausgegangen werden. Dies wird bei der Zertifizierung des C-Senken-Wertes je nach eingesetztem Feedstock noch einmal einzeln betrachtet, so dass je nach Bedarf neue Feedstock-Klassen für die C-Senken Zertifizierung eröffnet werden können.

3. Abzüge für produktionsbedingte Emissionen

3.1 Energie- und Treibstoffaufwand für Transport, Bereitstellung der Biomassen und Nachbehandlung der Pflanzenkohle

Der Energie- und Treibstoffaufwand für die gesamten Prozesskette von der Bereitstellung der Biomasse bis zur Abfüllung der Pflanzenkohle wird in CO₂eq berechnet und vom C-Senken-Wert der Pflanzenkohle abgezogen. Dies betrifft insbesondere

- (1) den Transport der Biomasse zur Pyrolyseanlage,
- (2) das Zerkleinern, Homogenisieren, Pelletieren und Trocknen der Biomasse,
- (4) Nachbehandlung der Pflanzenkohle (z.B. Mahlen, Pelletieren),
- (5) Transport der Pflanzenkohle zum Abhollager (Fabrikator).

Bei der Zertifizierung werden für diese einzelnen Schritte der Verbrauch an Strom- und Treibstoff abgefragt. Die Umrechnung des Stromverbrauchs in CO₂eq erfolgt auf Basis der spezifischen Angaben des vertraglichen Energieversorgers oder des durchschnittlichen CO₂eq-Werts des regional verwendeten Strommixes. Wird erneuerbare Energie verwendet, so wird ein CO₂eq von Null angenommen. Letzteres gilt ebenfalls, wenn die Pyrolyseanlage selbst Strom erzeugt und mindestens die dem Verbrauch äquivalente Strommenge ins Netz einspeist.

Für den Verbrauch von Dieselkraftstoff für Transport, Häckseler, Trocknung usw. wird der vom deutschen Umweltministerium verwendete Umrechnungsfaktor von 3,2 kg CO₂eq / l Diesel angesetzt (Juhrich, 2016).

3.2 Externe Energie zum Betreiben der Pyrolyseanlage (Steuer- und Regeltechnik, Vorheizen, Heizen, Fördertechnik)

Auch wenn bei der Herstellung von Pflanzenkohle in der Regel ein Energieüberschuss produziert wird, da die Pyrolysegase verbrannt und energetisch genutzt werden, so ist für das Betreiben von Pyrolyseanlagen immer auch externe Energie nötig. So wird elektrische Energie für die Steuer- und Regeltechnik sowie das Fördern der Biomassen und Pflanzenkohle benötigt. Je nach Anlagentyp wird zudem (fossiles) Brenngas oder Strom für das Vorheizen der Reaktoren benötigt.

Bestimmte Anlagentypen produzieren neben Pflanzenkohle auch Pyrolyseöl und Pyrolysegas, verwenden dafür aber elektrische Energie zum Erhitzen der Biomasse.

Zur Berechnung des CO₂-Fussabdrucks der Pyrolyseanlage ist es folglich nötig, dass jede Anlage mit einem eigenen Stromzähler ausgestattet wird. Mittels des Stromzählers wird so

der effektive Stromaufwand pro Produktionscharge bestimmt und über die CO₂-Emissionen pro kWh des verwendeten Strommixes in CO₂eq umgerechnet.

Die Menge der Treibstoffe, die für das Beheizen der Pyrolysereaktoren verwendet werden, sind pro Batch anzugeben und werden nach Treibstoffart in CO₂eq umgerechnet (65 t CO₂eq pro TJ (Jührich, 2016)).

3.3 Methanemissionen während des Pyrolyseprozesses

Bei der Pyrolyse werden die Pyrolysegase in aller Regel in einem entsprechend ausgelegten Brenner oxidiert. Die vor allem aus CO₂ bestehenden Verbrennungsprodukte werden emittiert. Ist der Pyrolyseprozess sauber eingestellt und der Gasbrenner von hoher Qualität, so können die Schadstoffe im Abgasstrom sehr gering gehalten werden. Hinsichtlich der Klimabilanz ist hier insbesondere der Ausstoß von Methan (CH₄) relevant. Die anderen Verbrennungsprodukte des Pyrolysegases wie CO, NO_x, SO_x, PM usw. sind zwar ebenfalls schädlich für die Umwelt, haben aber laut IPCC keinen eindeutigen zu bewertenden Treibhausgaseneffekt (IPCC, 2013) und werden daher für die Berechnung des C-Senken Potentials zumindest vorläufig nicht herangezogen.

Methan hat ein Klimaerwärmungspotential (GWP100), das über einen Zeitraum von 100 Jahren 34 mal höher ist als das von CO₂ (Myrhe et al., 2013). Insofern die entscheidende Phase für die Begrenzung der Klimaerwärmung die kommenden Jahrzehnte bis 2050 sind, sollte anstatt des GWP100 vielmehr das Klimaerwärmungspotential über den Zeitraum von 20 Jahren (GWP20) zugrunde gelegt werden, um die Vermeidung dieser kritischen Emissionen zu fördern. Der GWP20 von Methan beträgt 86. Innerhalb der ersten 20 Jahre nach der Emission ist die klimaerwärmende Wirkung von Methan folglich 86 mal größer als die von CO₂ im gleichen Zeitraum.

Aufgrund dieses sehr hohen GWP20 von Methan haben bereits sehr kleine Methanemissionen während des Pyrolyseprozesses großen Einfluss auf die Klimabilanz von Pflanzenkohle. Bei Pyrolyseanlagen ohne gesteuerte Nachverbrennung der Pyrolysegase (z.B. Kon-Tiki oder traditionelle Kohlemeiler) kann der Klimaerwärmungseffekt der Methanemissionen in den ersten 20 Jahren den klimapositiven Effekt der Pflanzenkohle sogar übersteigen. Aus diesem Grund ist es von besonderer Bedeutung, die Methanemissionen systematisch zu kontrollieren.

Die Messung von geringen Methanemissionen unter 5 ppm sind technisch jedoch sehr aufwändig. Eine kontinuierliche Messung über ein ganzes Produktionsjahr würde Kosten verursachen, die deutlich über den prognostizierten Einnahmen für den Aufbau von C-Senken lägen. Da folglich die Emissionen von Einzelanlagen nicht ausreichend überwacht

Beispiel zur Berechnung des Kohlenstoff-Aufwands der Pyrolyse (Fortsetzung)

- Bei einer Jahresproduktion von 500 t Pflanzenkohle (Trockensubstanz = TS) mit einem Kohlenstoffgehalt von 75% werden 50.000 kWh **Elektrizität zum Betreiben der Pyrolyseanlage** verbraucht. Der lokale Strommix emittiert 450 g CO₂eq pro kWh. Somit beträgt der Kohlenstoffaufwand für den Stromverbrauch $50.000 \text{ kWh} * 0,45 \text{ kg CO}_2\text{eq kWh}^{-1} = 22,5 \text{ t CO}_2\text{eq}$ pro Jahr. Umgerechnet auf eine Tonne Pflanzenkohle ergibt dies $(22,5 \text{ t CO}_2\text{eq} / 500 \text{ t}) = 45 \text{ kg CO}_2\text{eq}$.
- Die Emissionsmessung der Pyrolyse ergeben einen Methananteil von 10 ppm ($6,6 \text{ mg CH}_4 \text{ m}^{-3}$) im Abgas. Bei einer Tagesproduktion von 3 t Pflanzenkohle beträgt der Abgasvolumenstrom 45.000 m^3 . Somit ergibt sich pro Tag eine **Methanemission** von $45.000 \text{ m}^3 * 6,6 \text{ mg CH}_4 / \text{m}^3 = 0,3 \text{ kg CH}_4$. Unter Verwendung des GWP20 von 86 CO₂eq für Methan ergibt sich ein täglicher CO₂eq von $(0,3 \text{ kg CH}_4 * 86) = 25,5 \text{ kg}$, woraus sich ein Kohlenstoffaufwand von $(25,5 \text{ kg} / 3 \text{ t}) = 8,5 \text{ kg CO}_2\text{eq}$ pro t Pflanzenkohle (TS) ergibt.
- Zum **Vorheizen der Pyrolysereaktoren** werden pro Jahr 5 t Flüssiggas (LPG) mit einem CO₂eq von 3 t CO₂eq / t verbraucht. Dies ergibt einen Kohlenstoffaufwand von 15 t CO₂eq pro Jahr bzw. 30 kg CO₂eq pro t Pflanzenkohle (TS).
- Der **Gesamtkohlenstoffaufwand** für die Pyrolyse wird von $(45 \text{ kg} + 8,5 \text{ kg} + 30 \text{ kg}) = 83,5 \text{ kg CO}_2\text{eq}$ in $(83,5 \text{ kg CO}_2\text{eq} / 44\text{u} * 12\text{u}) = 22,8 \text{ kg C}$ pro t Pflanzenkohle (TS) umgerechnet. Dies ergibt $(22,8 \text{ kg C pro } 1000 \text{ kg Pflanzenkohle}) = 2,3$ Massenprozent.
- Einschließlich des Kohlenstoffaufwands für die Bereitstellung der Biomasse (siehe Kasten oben) ergibt sich somit ein **C-Senken Potential** der Pflanzenkohle ab Fabrikator von 75% (C-Gehalt) - 5,3% (Biomasse-Aufwand) - 2,3% (Pyrolyseaufwand) = 67,4%.
- Ein **Bigbag** mit 381 kg Pflanzenkohle und einem Wassergehalt von 25% hätte demnach ein **C-Senken Potential** von $(381 \text{ kg} * (1-25\%) * 67,4\%) = 193 \text{ kg Kohlenstoff}$ bzw. $(193 \text{ kg} * 44\text{u} / 12\text{u}) = 707 \text{ kg CO}_2\text{eq}$.

werden können und wenige Einzelmessungen nicht repräsentativ genug sind, wurde zur Bewertung der Klimabilanz von Pyrolyseanlagen eine Typenzertifizierung eingeführt.

Um eine Typenzertifizierung durchzuführen, müssen mindestens drei weitestgehend baugleiche Pyrolyseanlagen eines Herstellers im Praxisbetrieb stehen. Von diesen mindestens drei Anlagen müssen mindestens je zwei unabhängige, staatlich akkreditierte Emissionsmessungen incl. CH₄ oder C_xH_x vorliegen. Aus diesen Messungen wird ein

statistischer Mittelwert mit Standardabweichung berechnet. Als durchschnittliche Methanemission dieses Anlagentyps gilt dann der Mittelwert zuzüglich der Standardabweichung. Liegen die Messergebnisse für Methan oder C_xH_x sämtlich unter dem Grenzwert der verwendeten Messgeräte, so wird der Grenzwert als durchschnittliche Methanemission angenommen. Die in die Berechnung eingehenden Methanemissionen sind somit höher als der ermittelte Durchschnitt und weisen damit aber eine ausreichend hohe Sicherheitsmarge aus, um etwaige Emissionsspitzen z.B. im An- und Abfahrbetrieb abzudecken. Die Messwerte für Methanemissionen werden in ppm des Abgases angegeben und über den Abgasstrom pro Masseneinheit Biomasse-Input in $g CH_4$ pro t Pflanzenkohle umgerechnet. Die Berechnung des CO_{2eq} der Methanemissionen erfolgt mittels des GWP20 von 86.

Auf Antrag können auch individuelle Messungen der Methanemissionen einzelner Anlagen anerkannt werden. Dazu muss vorab eine detaillierte Mess-Strategie mit genauen Angaben zur Messtechnik, Messintervallen und Messgenauigkeit zur Prüfung vorgelegt werden.

4. Pflichtangaben für die Zertifizierung des C-Senken Potentials

Zur Angabe des C-Senken Potentials werden für jede Verpackungseinheit der C-Gehalt, das H/Corg – Verhältnis sowie das Gewicht und die Trockenmasse der abgefüllten Pflanzenkohle benötigt. Während der C-Gehalt und das H/Corg Verhältnis direkt aus der EBC-Zertifikatsanalyse übernommen werden können, müssen Gewicht und Trockenmasse der Pflanzenkohle für jede Verpackungseinheit bestimmt und deklariert werden.

4.1 Werkseitige Ermittlung der Trockensubstanz

Es ist zu beachten, dass sowohl der Wassergehalt als auch die Schüttdichte von Pflanzenkohle erheblichen Schwankungen unterliegen kann. Während der Wassergehalt vor allem durch unterschiedliche Intensität des Ablöschens am Austrag, durch Aufnahme von Luftfeuchtigkeit oder Lufttrocknung variiert, verändert sich die Schüttdichte vor allem durch Abrieb beim Umschütten und Transport. Sofern werksseitig nicht sichergestellt werden kann, dass die Pflanzenkohle bei der direkten Abfüllung der Verpackungseinheiten am Auslass der Pyrolyseanlage einen nur geringfügig schwankenden Wassergehalt von $\pm 3\%$ aufweist, muss jeweils zum Zeitpunkt der Abfüllung für jede Verpackungseinheit von mehr als $1 m^3$ der Trockensubstanzgehalt gesondert bestimmt und ausgewiesen werden.

Zur werkseitigen Bestimmung des Trockensubstanzgehaltes müssen pro m^3 Pflanzenkohle mindestens 10 l Pflanzenkohle entnommen werden. Die frische Pflanzenkohle wird mittels einer Waage mit einer Präzision von mindestens 1 Gramm gewogen. Sodann wird die Pflanzenkohle für mindestens 8 Stunden bei $110\text{ }^\circ\text{C}$ getrocknet und daraufhin wieder

gewogen. Der Trockensubstanzgehalt wird durch Division des Gewichts nach dem Trocknen mit dem Gewicht vor dem Trocknen berechnet.

Die tägliche Trockensubstanzbestimmung ist ein nicht ganz unerheblicher Aufwand für die Produzenten von Pflanzenkohle, aber es ist unablässig, um das C-Senken Potential zu bestimmen. Es handelt sich bei Pflanzenkohle basierten C-Senken um jahrhundertelange Kohlenstoffspeicher, so dass auch kleine Abweichungen bei der Bestimmung der sequestrierten Kohlenstoffmengen große, durch die Zeit potenzierte Wirkungen hätten.

5. Verwendung und Handel des C-Senkenwerts durch akkreditierte Makler und Plattformen

Das C-Senken Potential des EBC-Zertifikates ist kein CO₂-Zertifikat zur Kompensation von Emissionen und kann auch nicht als ein solches verkauft werden. Ab dem Moment, wo ein mit Pflanzenkohle gefüllter Container oder sonstiges Gebinde das Fabrikgelände verlässt, kann viel mit der Pflanzenkohle geschehen, was das C-Senken Potential reduziert oder komplett schwinden lässt. Wenn beim Transport der Pflanzenkohle fossile Treibstoffe verbrannt oder beim Pelletieren Strom verbraucht wird, so reduziert sich das C-Senken Potential um die dabei verursachten Treibhausgasemissionen. Wenn die Pflanzenkohle z.B. als Holzkohle verbrannt, zu Aktivkohle verarbeitet oder als Reduktionsmittel in der Stahlherstellung verwendet würde, ginge ein wesentlicher Anteil des Kohlenstoffs verloren. Erst wenn die Pflanzenkohle schließlich im Boden oder in dauerhaften Materialien eingebunden ist, kann auch davon ausgegangen werden, dass die C-Senke langfristig berechenbar und kontrollierbar erhalten bleibt.

Das C-Senken Potential gibt also zunächst nur die momentane „Füllhöhe“ eines Kohlenstoffspeichers wieder, d.h. es gibt an, welcher Anteil vom Trockengewicht einer Pflanzenkohle ab Fabrikator als C-Senke anrechenbar ist. Solange die Verpackungseinheit verschlossen und geschützt auf dem Fabrikgelände gelagert ist, bleibt das C-Senken Potential unverändert erhalten.

Das EBC zertifizierte C-Senken Potential kann das Pflanzenkohle herstellende Unternehmen bei C-Senken Maklern oder Handelsplattformen registrieren lassen. Mittels eines sicheren Tracking-Systems verfolgen diese den Weg der Pflanzenkohle vom Fabrikator zur eigentlichen C-Senke (z.B. Einbringung in Böden oder Materialien). Ab dem Moment, wo die Pflanzenkohle in eine solche Matrix eingebunden wurde, kann das C-Senken Potential unter Abzug aller vom Fabrikator bis zur C-Senke verursachten Treibhausgasemissionen in C-Senken Zertifikate umgewandelt werden. Diese C-Senken Zertifikate können sodann verkauft und gehandelt werden, womit der EBC-zertifizierte Hersteller der Pflanzenkohle für seine erbrachte Klimadienstleistung vergütet wird. Auf Basis der C-Senken Zertifikate können CO₂ Emissionen kompensiert oder C-Senken-Portfolios aufgebaut werden. Die Handelsplattformen müssen dabei mittels des Tracking-Systems folgendes sicherstellen:

- 1) Jedwede Emission von Treibhausgasen, welche beim Transport, bei der Weiterverarbeitung (z.B. Mahlen, Mischen) sowie bei der Einbringung in eine finale Lagerstätte (z.B. Boden, Beton, Asphalt o.ä.) nach Verlassen des Werktores des EBC zertifizierten Pflanzenkohle-Herstellers anfällt, muss vom C-Senken Potenzial abgezogen werden. Als finale Lagerstätte gilt bereits die Einbringung in Substrate wie Kompost, Einstreu, Futtermittel, Dünger oder Zement, Sand, Lehm und Kalk, da auf diese Weise eine Verbrennung der Pflanzenkohle und damit der Verlust des Kohlenstoffs ausgeschlossen werden kann.
- 2) Der Lebenszyklus der finalen Lagerstätte bzw. der Abbau der Pflanzenkohle in der finalen Lagerstätte muss einberechnet werden. Bei der Mischung in Substrate und Futtermittel, die schließlich in landwirtschaftliche oder urbane Böden eingebracht werden, muss sodann die jährliche Abbaurate der Pflanzenkohle entsprechend des H/C_{org} -Verhältnisses der Pflanzenkohle angesetzt werden (Camps-Arbestain et al., 2015; IPCC, 2019). Auf diese Weise kann die jährliche Entwicklung des C-Senkenwerts auch über längere Zeiträume von 100 oder 250 Jahre angegeben bzw. in Jahrestrenchen gehandelt werden.
- 3) Es muss effizient verhindert werden, dass es zu Doppelzertifizierungen kommt. Wenn in den Boden eingebrachte Pflanzenkohle zum Beispiel als C-Senke zertifiziert wurde, darf der Besitzer des Bodens die Pflanzenkohle nicht auch noch über Humuszertifikate als C-Senke verkaufen. Dies muss z.B. durch einen entsprechenden Vermerk auf dem Lieferschein der Pflanzenkohle vom Endkunden durch Unterschrift bestätigt werden. Pflanzenkohle, deren Nachverfolgung nicht sichergestellt ist, darf im Handelssystem nicht als C-Senke geführt werden.

Bei der Einbindung von Pflanzenkohle in industrielle Materialien wie Kunststoffe oder Asphalt muss durch geeignete Überwachungsmethoden (z.B. elektronisches Tracking, Satelliten oder auch statistisch abgesicherte Durchschnittswerte für die Lebensdauer) sichergestellt werden, dass sich das pflanzenkohlehaltige Material weiterhin in Verwendung befindet und nicht durch Verbrennung in CO_2 umgewandelt wurde.

Für die Einbindung in Baumaterialien wie Beton, Kalkputz, Gips oder Lehm kann von einer dauerhaften Senke ausgegangen werden, da das Baumaterial eine Verbrennung unmöglich macht und weit besser als der Boden vor biologischem und chemischem Abbau schützt. Für Zeiträume von 100 – 250 Jahren muss hierfür keine Abbaurate in Betracht gezogen werden.

Um sicher zu stellen, dass das Trackingsystem lückenlos funktioniert und dass beim Handel von C-Senken auf Jahresbasis stets nur die Menge einer C-Senke als Klimadienleistung verkauft wird, die auch tatsächlich unter Abzug aller THG-Verluste als C-Senke Bestand hat, führt das EBC eine Akkreditierung von C-Senken Händlern und Handelsplattformen ein.

Herstellern von Pflanzenkohle wird empfohlen, die EBC zertifizierten C-Senkenwerte nur an EBC akkreditierte C-Senken Händler zu verkaufen. Nur so kann garantiert werden, dass nur die Menge Kohlenstoff als Senke zertifiziert und verkauft wird, die tatsächlich in Form von CO₂ aus der Atmosphäre entzogen wurde.

Selbstverständlich kann sich auch ein Pflanzenkohle Hersteller als C-Senken Händler akkreditieren lassen und somit CO₂-Zertifikate zum Beispiel an Landwirte oder Bauunternehmer oder an Dritte verkaufen.

Zitierte Literatur

- Camps-Arbestain M, Amonette JE, Singh B, Wang T, Schmidt H-P. 2015. A biochar classification system and associated test methods. In: Lehmann J, Joseph S eds. *Biochar for environmental management*. London: Routledge, 165–194.
- EU-Parlament. 2018. *Verordnung (EU) 2018/841 über die Einbeziehung der Emissionen und des Abbaus von Treibhausgasen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft in den Rahmen für die Klima- und Energiepolitik bis 2030*. Brüssel.
- IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge.
- IPCC. 2019. Method for estimating the change in mineral soil organic carbon stocks from biochar amendments: basis for future methodological development. In: *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. IPCC, Ap4.1.
- Juhrich K. 2016. *CO₂-Emissionsfaktoren für fossile Brennstoffe*. Berlin.
- Kuzyakov Y, Bogomolova I, Glaser B. 2014. Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 70:229–236. DOI: 10.1016/j.soilbio.2013.12.021.
- Lehmann J, Abiven S, Kleber M, Pan G, Singh BP, Sohi SP, Zimmerman AR. 2015. Persistence of biochar in soil. In: Lehmann J, Joseph SD eds. *Biochar for environmental management*. London: Routledge, 235–299.
- Myrhe GD, Chindell F-M, Bréon W, Collins J, Fuglestvedt J, Huang D, Koch J-F, Lamarque D, Lee B, Mendoza T, Nakajima A, Robick G, Stephens T, Takemura T, Zhang H. 2013. Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM eds. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, USA,.
- Song J, Chen C, Zhu S, Zhu M, Dai J, Ray U, Li Y, Kuang Y, Li Y, Quispe N, Yao Y, Gong A, Leiste UH, Bruck HA, Zhu JY, Vellore A, Li H, Minus ML, Jia Z, Martini A, Li T, Hu L. 2018. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material. *Nature* 554:224–228. DOI: 10.1038/nature25476.
- Zhang W-F, Dou Z-X, He P, Ju X-T, Powlson D, Chadwick D, Norse D, Lu Y-L, Zhang Y, Wu L, Chen X-P, Cassman KG, Zhang F-S. 2013. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110:8375–8380. DOI: 10.1073/pnas.1210447110.

