



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra



Bundesamt für Umwelt BAFU

Bundesamt für Landwirtschaft BLW

Faktenblatt

Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft

Risiken und Chancen für Boden und Klima

Impressum

Herausgeber

Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Landwirtschaft (BLW), Arbeitsgruppe Interventionswerte und Risikobeurteilung (AGIR) des Cercle Sol

Kontakte

Gudrun Schwilch, Sektion Boden, BAFU, gudrun.schwilch@bafu.admin.ch

Regine Röthlisberger, Abteilung Klima, BAFU, regine.roethlisberger@bafu.admin.ch

Michael Zimmermann, Fachbereich Agrarumweltsysteme und Nährstoffe, BLW, michael.zimmermann@blw.admin.ch

Rebecca Keusch, Vorstand AGIR, rebecca.keusch@tg.ch

PDF-Download

www.bafu.admin.ch > Thema Klima > Fachinformationen > CO₂-Entnahme und -Speicherung

Dieses Faktenblatt ist auch in französischer und italienischer Sprache verfügbar.
Die Originalversion ist Deutsch.

© BAFU 2023

Das Faktenblatt legt den Stand der Wissenschaft zum Einsatz von Pflanzenkohle in der Schweizer Landwirtschaft dar und zeigt die derzeitigen Vorgaben zum Umgang mit Pflanzenkohle auf. Es soll in erster Linie die Praxis und die Verwaltung informieren und hat keinen Vollzugscharakter.

Das Wichtigste in Kürze

- Pflanzkohle (PK; engl. Biochar) bezieht sich in diesem Faktenblatt auf das feste Produkt frisch «verkohlt», pflanzlicher Biomasse. Insbesondere werden hier die Eigenschaften von Pyrolyse-Pflanzkohlen beschrieben (Kapitel 1).
- Die rechtlichen Vorgaben für die Produktion, das Inverkehrbringen und den Einsatz von PK müssen zwingend eingehalten werden, damit keine Schadstoffe in die Umwelt gelangen (Kapitel 2).
- Bei der privaten Herstellung von PK für den Eigenbedarf bestehen besondere Risiken für Hersteller, Luft und Boden durch Schadstoffe (Kapitel 2.2.3).
- Es besteht eine Konkurrenz um begrenzte organische Reststoffe (Biomasse). Der optimale Verwertungspfad hängt von mehreren Einflussfaktoren ab, zum Beispiel kann der Pyrolyse-Prozess hinsichtlich Energieausbeute oder PK-Ertrag optimiert werden. Die Herstellung von Pflanzkohle sollte der Schweizerischen Biomassestrategie möglichst gerecht werden (Kapitel 3).
- Die Wirkung auf Böden und Klima sind vom Ausgangsmaterial und dem Pyrolyse-Prozess für PK abhängig. Für Schweizer Böden ist nicht zu erwarten, dass positive Auswirkungen auf die Ertragsfähigkeit gleichzeitig mit einer hohen Speicherung von Kohlenstoff einhergehen, wie dies für tropische Böden gezeigt werden konnte (Kapitel 3). Es muss verhindert werden, dass das Einbringen von PK aus Gründen des Klimaschutzes negative Auswirkungen auf den Boden verursacht.
- In der Schweiz wurde bisher keine Ertragssteigerung in der landwirtschaftlichen Produktion durch die Zugabe von PK nachgewiesen (Kapitel 3.1).
- Rund um den Einsatz von PK in der Landwirtschaft gibt es verschiedene Unklarheiten, vor allem im Hinblick auf langfristige Auswirkungen der PK auf Böden und Bodenlebewesen (Kapitel 3.1 und 3.3). Die Auswirkungen sind abhängig von Standortfaktoren und Eigenschaften der PK und können irreversibel sein. Auch ausserhalb der Landwirtschaft wird PK eingesetzt, beispielsweise in technischen Substraten für Stadtbäume oder in Dämmstoffen in Gebäuden (Kapitel 3.1).
- PK kann einen Beitrag zur Minderung des Klimawandels leisten. Das klimawirksame Potenzial auf Schweizer Landwirtschaftsböden ist hingegen beschränkt und kann aufgrund der Abhängigkeit von zahlreichen Annahmen nur ungenau abgeschätzt werden (Kapitel 3.4).
- Der Einsatz von PK in der Landwirtschaft ist heute meistens wirtschaftlich nicht rentabel (Kapitel 3.4).
- Es besteht Forschungsbedarf, um die bestehenden Wissenslücken hinsichtlich langfristiger Auswirkungen auf Bodeneigenschaften und Bodenlebewesen zu schliessen. Ebenso nötig sind Ökobilanzstudien, die verschiedene Verwertungspfade von Biomasse mit und ohne Herstellung von PK vergleichen (Kapitel 3.5).
- Im Sinne der Vorsorge wird vom weitflächigen Einsatz von PK abgeraten, solange schädliche Auswirkungen nicht ausgeschlossen werden können, beispielsweise auf Bodenlebewesen. Folgerungen aus den Vorgaben und dem aktuellen Wissensstand für den Einsatz von PK in der Landwirtschaft werden in Kapitel 4 gegeben.

1 Grundlagen

Das Faktenblatt bezieht sich mit der Bezeichnung Pflanzenkohle (PK; engl. Biochar) auf das feste Produkt frisch «verkohler», pflanzlicher Biomasse. Bei PK, die in Böden eingebracht wird, handelt es sich in der Regel um Pyrolyse-Kohle¹. Diese wird bei Temperaturen zwischen 350 und 1000°C und bei atmosphärischem Druck unter weitgehendem Ausschluss von Sauerstoff innerhalb von Minuten bis Stunden gebildet [60] [67]. Als Ausgangsmaterial kommt zwar theoretisch jegliche Biomasse in Frage – de facto muss sie jedoch in der Schweiz bestimmte Kriterien erfüllen (siehe Kapitel 2).

Charakteristisch für PK ist der relative hohe Kohlenstoffgehalt (für Holz: 75–95%), der mit Ausgangsmaterial und Herstellungsprozess (u.a. Pyrolyse Temperatur) variiert [59] [60] [67]. PK können eine grosse spezifische Oberfläche (> 100 m²/g) haben, welche Austauschplätze für Nährstoffe aber auch Schadstoffe bietet und die Wasserhaltekapazität des Bodens erhöhen kann [60] [67]. Die Wirkungsleistung und Stabilität von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft und Umwelt, hängt jedoch nicht nur von den Eigenschaften der PK, sondern auch von pedo-klimatischen Faktoren ab [44] [60] [67].

Die chemische Struktur der PK sorgt dafür, dass sie in der Umwelt über viele Jahre stabil sein kann [49] [60] [67]. Obwohl noch kaum Ergebnisse aus Langzeitversuchen, insbesondere von Böden der gemässigten Breiten wie in der Schweiz, verfügbar sind, deuten bisherige Daten darauf hin, dass in Böden ausgebrachte PK relativ wenig Kohlenstoff (C) verliert: Während der Pyrolyse wird ungefähr die Hälfte des C des Ausgangsmaterials in gasförmige Stoffe überführt und der andere Teil in PK umgewandelt. Von dieser PK verbleibt der Grossteil des C nach Ausbringung im Boden; während im Vergleich nur ein kleiner Anteil von nicht pyrolysierte Biomasse verbleiben würde. Auf längere Sicht wird PK langsamer abgebaut als in den ersten Jahren. Die Speicherung des über die Biomasse aus der Atmosphäre entnommenen C als PK im Boden wirkt in dieser Zeit dem Klimawandel entgegen.

Die pyrolytische Verkohlung der Biomasse ist eine exotherme Reaktion, setzt also Energie frei. Die Pyrolyse ist mit Risiken verbunden: Schadstoffe wie Schwermetalle oder Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) können sich in der PK anreichern oder bei nicht optimierter Prozesssteuerung entstehen (siehe Kapitel 2.2) [67]. So können die Luft und Umwelt durch Abgase belastet und der Boden durch PK-Gabe kontaminiert werden. Letzteres muss durch einen professionellen Umgang verhindert werden.

Die Verwendungsmöglichkeit als PK für Biomasse kann sinnvolle Stoffströme ergeben, könnte aber auch die Nutzungskonkurrenzen zwischen Energie-, Lebensmittel-, Futtermittel- und Humuswirtschaft verschärfen [51] [53] [73].

Es fehlen langfristige Erfahrungswerte unter typischen, hiesigen Feldbedingungen und Bewirtschaftungsmethoden. Dies führt zu grossen Unsicherheiten bei der Bewertung der Auswirkungen von in Böden eingebrachter PK [67].

¹ Abgrenzend sei die Hydrothermale Carbonisierung (HTC) als weiteres Verkohlungsverfahren unter Zugabe von Wasser bei 180-250°C und Drücken von 20–50 bar genannt. [66] [67]

2 Vorgaben zum Umgang mit Pflanzenkohle

Der Einsatz von PK muss sich in bestehende Politiken und Strategien einfügen. Es seien insbesondere die Klima- [15] [17] und Energiepolitik [6] [20] sowie die Bodenstrategie [22], die Biodiversitätsstrategie [14], die Biomassestrategie [18] und die Ressourcenpolitik Holz 2030 [16] genannt.

2.1 Allgemeine Übersicht zu den Vorschriften über den Umgang mit Pflanzenkohle

Folgende Rechtstexte tangieren u.a. die Herstellung und Ausbringung von PK. Das Umweltschutzgesetz (USG) [4] fordert, die biologische Vielfalt und die Fruchtbarkeit des Bodens dauerhaft zu erhalten und im Sinne der Vorsorge Einwirkungen, die schädlich oder lästig werden könnten, frühzeitig zu begrenzen. Die Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo) [8] beschreibt, wann ein Boden als fruchtbar gilt. Die Dünger-Verordnung (DüV) [9] regelt die Zulassung, das Inverkehrbringen, die Einfuhr und die Verwendung von Düngern und damit auch von PK. Die Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung (ChemRRV) [12] stellt hinsichtlich der Abgabe Qualitätsanforderungen an Dünger und regelt verschiedene Einschränkungen und Verbote für die Verwendung von Düngern (siehe im Detail Anhang 2.6 ChemRRV). Das Gewässerschutzgesetz (GSchG) [5] bezweckt, die oberirdischen Gewässer und das Grundwasser vor nachteiligen Einwirkungen zu schützen, insbesondere sind demnach auch Böden so zu bewirtschaften, dass die Gewässer nicht beeinträchtigt werden, namentlich nicht durch Abschwemmung und Auswaschung von Düngern (auch: [19]). Weiter verlangt das Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz (NHG) [1] den Erhalt der biologischen Vielfalt. Überdies soll die landwirtschaftliche Produktion gemäss dem Landwirtschaftsgesetz (LwG) [2] dazu beitragen, die natürlichen Lebensgrundlagen zu erhalten. Die Futtermittel-Verordnung (FMV) [10] regelt Anforderungen bezüglich Futtermittel und Zusätzen. Für die Herstellung von PK muss die Luftreinhalte-Verordnung (LRV) [7] eingehalten werden, die Mensch und Umwelt vor schädlichen oder lästigen Luftverunreinigungen schützen soll. Unter der geltenden CO₂-Gesetzgebung (Stand 1. Januar 2023) [3] [11] sind PK-Projekte unter bestimmten Auflagen zugelassen und können handelbare CO₂-Bescheinigungen generieren, die zum Beispiel für die Kompensation von CO₂-Emissionen im Verkehr verwendet werden können [17]. Insbesondere begrenzt die aktuelle CO₂-Verordnung die kumulative Menge PK für Kompensationsprojekte auf 8 t/ha von 2022 bis 2030 [11].

2.2 Ausgangsmaterialien und die Herstellung von Pflanzenkohle

Um zu verhindern, dass sich Schadstoffe wie Schwermetalle über die PK im Boden anreichern, muss das Ausgangsmaterial sorgfältig ausgewählt werden [65] [67].

Beim Herstellungsprozess sind geeignete Pyrolyse-Bedingungen entscheidend, um die Menge entstehender Schadstoffe, insbesondere polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK), gering zu halten [67]. PAK können die Pyrolyse-Anlage als Luftschadstoff verlassen oder an der PK kondensieren.

2.2.1 Ausgangsmaterialien

Es darf ausschliesslich naturbelassenes Ausgangsmaterial verwendet werden. Zur Herstellung möglichst schadstoffarmer PK unter geringer Rauchentwicklung dürfen nur natürliche Wald-, Feld- und Gartenabfälle (möglichst trocken) und naturbelassenes Holz verwendet werden [7]. Demzufolge ist der Einsatz jeglichen Holzes, welches bereits anderweitig verwendet wurde oder mit holzfremden Stoffen in Berührung kam (Altholz, problematische Holzabfälle), zur Herstellung von PK verboten. Ansonsten besteht die besondere Gefahr, dass bei der Pyrolyse hochtoxische Dioxine und Furane oder andere (Luft-)Schadstoffe entstehen können [67].

In professionellen Pyrolyse-Anlagen und unter Einhaltung des European Biochar Certificates (EBC) können derartige Risiken weitestgehend minimiert werden [65]. Das EBC definiert eine Positivliste der zu verwendenden Materialien und gibt Grenzwerte für enthaltene Stoffkonzentrationen.

2.2.2 Gewerbliche Herstellung

Bei der Herstellung von PK entstehen Luftschadstoffe, die die Umgebung belasten können und gemäss den Anforderungen der LRV minimiert werden müssen [7]. Es gibt unterschiedliche Herstellungsverfahren und Anlagentypen [67] [68]. Eine gewerbliche Pyrolyse-Anlage wird in jedem Fall

durch die zuständige Behörde (Kanton, Gemeinde) beurteilt und bewilligt, wobei sie die relevanten Anforderungen der LRV anwendet (Emissionsgrenzwerte, Fassung und Ableitung der Abgase etc.) [7].

2.2.3 Herstellung für den Eigengebrauch

Auch bei einer privaten Herstellung von PK für den Eigengebrauch, beispielsweise nach dem Prinzip Kon-Tiki², müssen die Vorgaben der Luftreinhalte-Verordnung (LRV) eingehalten werden [7]. Die zuständige Behörde kann gestützt auf Artikel 4 der LRV vorsorgliche emissionsbegrenzende Massnahmen festlegen, sowie den Einsatz bestimmter Anlagen einschränken oder untersagen. Es ist darauf zu achten, dass beim gesamten Prozess wenig Rauch entsteht, was mitunter stark von der Beschaffenheit und der Trockenheit des Brennstoffes abhängt. Die entstehenden Luftschadstoffe könnten sowohl die Gesundheit des Herstellers belasten als auch die unmittelbare Umgebung. Derartige Geräte weisen zudem teilweise hohe Emissionen an Methan und flüchtigen organischen Verbindungen (NMVOC) auf [32], was den Gesamtnutzen einer PK-Ausbringung für das Klima mindert und aus Sicht der Luftreinhaltung unerwünscht ist. Überdies besteht aus Sicht des Bodenschutzes die Gefahr einer hohen Schadstoffbelastung für Gaben von PK aus unkontrollierten Pyrolyse-Bedingungen [67].

2.3 Inverkehrbringen von Pflanzenkohle als Dünger

In einem Rechtsgutachten (H. Maurer) wird PK nicht als Fremdstoff eingeordnet [54]. Derzeit darf PK in der Schweiz mit einer Bewilligung des Bundesamts für Landwirtschaft (BLW) als Dünger in Verkehr gebracht werden, wenn nur naturbelassenes Holz als Ausgangsmaterial verwendet wird und weitere Bedingungen laut Merkblatt «Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle» eingehalten werden [21]. So soll die kontinuierliche Qualitätskontrolle betreffend Herstellung, Emissionsgrenzwerten und Schadstoffgehalten – gemäss European Biochar Certificate (EBC) Qualität Klasse 1 oder 2 [65] und ChemRRV [12] – gewährleistet werden. Das Merkblatt ist erhältlich bei der Zulassungsstelle für Dünger unter duenger@blw.admin.ch. Die Kontrollen der produzierten PK begrenzen sich auf die gewerblichen Produzenten, die PK als Dünger in Verkehr bringen. Auf 2024 wird eine revidierte Düngerverordnung in Kraft treten, welche sich an die europäische Düngerverordnung EU 2019/1009 [13] anlehnt. Dabei ist eine Ausweitung der Ausgangsmaterialien für die Herstellung von PK unter Einhaltung der derzeitigen Qualitätsanforderungen sowie eine maximale Ausbringungsmenge vorgesehen.

² Kon-Tikis sind relativ einfache Geräte aus Metall zur Herstellung von PK, die geeignet sein können, Kohle herzustellen, die den EBC-Kriterien genügen [32].

3 Fokus: Pflanzenkohle in landwirtschaftlich genutzten Böden

3.1 Auswirkungen auf die Böden

3.1.1 Landwirtschaftlicher Ertrag

Für Schweizer Landwirtschaftsböden konnte bisher keine Ertragssteigerung nach dem Ausbringen von PK nachgewiesen werden [44] [60]. Dies ist in erster Linie auf relativ junge Böden unter einem gemässigten Klima zurückzuführen und der entsprechend angepassten landwirtschaftlichen Praxis hierzulande. Im Gegensatz dazu stehen die beobachteten Verbesserungen der Ertragsfähigkeit in tiefgründig verwitterten tropischen Böden, welche eine sehr geringe Fruchtbarkeit aufweisen [39]. Auf eher wenig fruchtbaren, sauren und sandigen Böden konnte auch unter gemässigtem Klima eine Ertragssteigerung durch PK-Gabe beobachtet werden [40] [74]. Für die Schweiz kann nicht generell ein derartiger «*Terra Preta*³»-Effekt erwartet werden [44].

3.1.2 Organische Bodensubstanz

Die Ausbringung von PK kann die organische Bodensubstanz (OBS) beeinflussen. Verändert sich die Abbaurate der OBS nach Zugabe eines organischen Substrats, spricht man von Priming [67]. Dies kann zu einem schnelleren oder einem langsameren Abbau der OBS führen. Hierzu gibt es erst wenige Erkenntnisse, beide Fälle wurden innerhalb kurzer Untersuchungszeiträume beobachtet. Eine Modellierungsstudie [72] für stets wiederholte PK-Gaben gibt Hinweise, dass ein schnellerer Abbau der OBS (positives Priming) in den ersten Jahren über die nächsten Jahrzehnte durch einen langsameren Abbau der OBS (negatives Priming) abgelöst wird. So überwiegt nach 50–100 Jahren unter konstanten Modellbedingungen der OBS-Aufbau. Betrachtet man den Kohlenstoffgehalt, wird ein möglicher schnellerer Abbau der OBS durch den zusätzlichen pyrolytischen C bereits nach kürzerer Zeit mehr als ausgeglichen.

3.1.3 Bodenphysik

PK kann die bodenphysikalischen Eigenschaften beeinflussen [67]. Zwar gibt es erst wenige systematische Untersuchungen zu in der Schweiz vergleichbaren Bedingungen, aber die hervorgerufenen Änderungen, z.B. höhere Porosität und Wasserspeicherung oder eine bessere Aggregatstabilität, werden überwiegend als Vorteile herausgestellt [60]. PK verbessere die Wasserspeicherung in Trockenphasen und führe zu geringerer Erosionsanfälligkeit bei Starkregen. Hier bietet sich im Kontext des Klimawandels und der Zunahme sowohl von Trockenperioden als auch von Starkniederschlägen eine Möglichkeit zur Steigerung der Anpassung. Insbesondere wird eine positive Wirkung der PK auf den Bodenwasserhaushalt bei sandigen Böden beschrieben. Dies bietet Chancen für technische Substrate (Technosole) ausserhalb der Landwirtschaft, beispielsweise für den Unterhalt von Stadtbäumen [62].

3.1.4 Nährstoffhaushalt

Die Einmischung von PK beeinflusst den Nährstoffhaushalt [39] [40] [44] [60] [67] [74]. Auch zu diesem Punkt fehlen systematische Untersuchungen für Schweizer Verhältnisse, aus denen sich Empfehlungen ableiten liessen. Die PK bietet durch ihre Porosität und hohe innere Oberfläche viele Austauschplätze für Nährstoffe. Hinzu kommen eine mögliche verbesserte Durchwurzelung und Aufnahme der Nährstoffe durch Pflanzen durch die Verbesserung der Wasserkapazität und Verringerung der Lagerungsdichte. Nicht zuletzt kann PK den pH-Wert des Bodens anheben [67]. PK in Böden kann die Auswaschung von Nährstoffen reduzieren und damit positiven Einfluss für Pflanzen aber auch Gewässer entfalten [29] [67]. Es gibt aber auch Feldbeobachtungen, die nur einen kurzfristigen Effekt belegen.

3.1.5 Risiken durch Schadstoffe und Pflanzenschutzmittel

Den möglichen positiven Auswirkungen steht das Risiko eines weitflächigen Schadstoffeintrages durch PK in Böden und die Anreicherung organischer Schadstoffe und Schwermetalle über die Zeit

³ Terra preta (portugiesisch für „schwarze Erde“) ist ein fruchtbarer, pflanzenkohlehaltiger anthropogener Boden, der über Jahrhunderte im Amazonasbecken entstand.

gegenüber [67]. Da sich gesundheitsgefährdende Schadstoffe in der Nahrungskette anreichern können, besteht eine Gefahr für Pflanze, Mensch und Tier. Diese Gefahr muss so weit wie möglich vermindert werden durch Anwendung einer guten Praxis wie in Kapitel 2 beschrieben. Zudem kann PK jedoch auch weitere Schadstoffe wie Pflanzenschutzmittel zurückhalten [67].

Die Kombination von PK und Pflanzenschutzmittel (PSM) wird ambivalent beurteilt [45] [66] [67]: Einerseits kann PK die Verfügbarkeit von PSM herabsetzen, also die unerwünschte Aufnahme von PSM durch Bodenlebewesen und Pflanzen aus der Bodenlösung verringern, gleichzeitig wird aber die gewünschte Wirkung von bodenwirksamen PSM herabgesetzt, was unter Umständen zu erhöhten Gaben von PSM führen kann. Da einige PSM bei Anwesenheit von PK langsamer abgebaut werden, kann es insgesamt zu einer als negativ zu beurteilenden Anreicherung von PSM in Böden kommen.

3.1.6 Bodenbiologie

Generell gibt es noch grosse Wissenslücken zur Bodenbiologie. Das gilt insbesondere für den Einfluss von PK auf biologische Parameter [50] [67], beispielsweise die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft und deren Leistungen [71]. Eine Betrachtung möglichst aller ökologischen Auswirkungen ist wesentlich, um potenziell negative Auswirkungen auf die Bodenlebewesen zu vermeiden, die für viele Funktionen des Bodens entscheidend sind. Unterschiedliche Wirkungen auf die Bodenlebewesen wurden beschrieben [30] [34] [52] [70]: Unter dem Einfluss von PK wurde beispielsweise erhöhte Biomasse der Bodenlebewesen, insbesondere bei mikrobiellen Organismen beobachtet. Bei sehr hohen (einmaligen) Ausbringungsmengen (von ≥ 10 t/ha) wurden negative Auswirkungen auf grössere Spezies, zum Beispiel auf Regenwürmer [30] gefunden. Die negative Beeinträchtigung von Regenwürmern ist aufgrund deren zentraler Rolle beim Abbau von organischem Material, im Nährstoffkreislauf und bei der Bodenbildung besonders heikel.

3.2 Auswirkungen auf das Klima

Auch auf die Bilanz von Treibhausgasen – dem wichtigsten Treiber des Klimawandels – wirkt sich die Ausbringung von PK in Böden aus [27] [46] [51]. Zunächst wurde atmosphärisches CO₂ in Pflanzen aufgenommen und der Kohlenstoff (C) über die Photosynthese in die Biomasse eingebaut. Aufgrund des relativ hohen Kohlenstoffgehaltes und der langsamen Abbaubarkeit der aus Biomasse produzierten PK besteht das Potential für eine langfristige C-Speicherung. Beispielsweise kann im Boden⁴ eingebrachte PK sogenannte «negative Emissionen» generieren (siehe auch Bericht des Bundesrats in Erfüllung des Postulates 18.4211 [61]). Abbauraten von PK in Böden sind abhängig von PK Eigenschaften und schwierig abzuschätzen, sie betragen vermutlich weniger als 0.3% pro Jahr, aber es gibt keine langfristigen Freilanduntersuchungen dazu unter typischen Bedingungen der Schweizer Landwirtschaft [60] [67]. Ein sehr kleiner Teil der PK baut sich schneller ab, während ein grösserer Teil über längere Zeit stabil im Boden bleibt. Es kann heute davon ausgegangen werden, dass die Permanenz für die stabile Fraktion der PK in Schweizer Böden zumindest Jahrzehnte, wenn nicht Jahrhunderte beträgt – ein Zeitraum, der für die Minderung des Klimawandels im 21. Jahrhundert hohe Relevanz hat.

Ein weiterer positiver Effekt für das Klima könnten verringerte Lachgas-Emissionen aus PK-bestückten Böden sein. Eine Metastudie [29] quantifiziert die N₂O-Reduktion mit zunächst 38%, zeigt jedoch auf, dass der Effekt nach einem Jahr vernachlässigbar klein ist und statistisch nicht signifikant. Für Methan zeigen sich Emissionsreduktionen v.a. für (periodisch) überflutete Böden. Nicht überflutete Böden, die eine natürliche Senke für CH₄ aus der Atmosphäre bilden, scheinen diese Funktion unter Einfluss von PK in geringerem Ausmass zu erfüllen [42].

3.3 Unbekannte Auswirkungen

Für alle hier beschriebenen Chancen und Risiken fehlen langfristige Untersuchungen, insbesondere unter Schweizer Bedingungen im Feldmassstab. Erst diese würden Effekte aufzeigen, die mit einer Alterung der PK und einem entsprechend veränderten System Boden auftreten könnten. Zwar kommt pyrogener Kohlenstoff auch natürlicherweise in Böden vor [57], dennoch gibt es einige unklare Auswirkungen von PK-Gaben. Hervorzuheben sind insbesondere die bereits angesprochenen widersprüchlichen Auswirkungen auf die Bodenbiologie und der damit verbundene Forschungsbedarf.

⁴ Abseits der Landwirtschaft könnte PK auch als Dämmstoff in Gebäuden oder in technischen Substraten zum Einsatz kommen. Als künstliche Lagerstätten sind auch Kavernen, Höhlen oder Bunker denkbar. Vorteilhaft wäre v.a. eine geringere Wechselwirkung mit der belebten Umwelt und die konzentrierte Lagermöglichkeit bei exakter Standortkenntnis und Dokumentationsmöglichkeit, verglichen mit einer weitflächigen und irreversiblen Verteilung in der Landwirtschaft.

Es muss verhindert werden, dass das Einbringen von PK aus Gründen des Klimaschutzes negative Auswirkungen auf den Boden verursacht.

Konkurrenz besteht um begrenzt verfügbare organische Reststoffe (Biomasse). Die Herstellung von PK sollte der Schweizerischen Biomassestrategie [18] möglichst gerecht werden. In Studien konnte gezeigt werden, dass die Eigenschaften der PK abhängig sind vom Ausgangsmaterial und den Bedingungen bei der Pyrolyse [67]. Zwar gibt es noch kein ganzheitliches Bild dieser Zusammenhänge, jedoch können Zielkonflikte aus der Sicht des Klimaschutzes und des agronomischen Nutzens auftreten. Dies, da der Pyrolyse-Prozess entweder hinsichtlich Energieausbeute oder PK-Ertrag optimiert werden kann und sich verschiedene PK unterscheiden bezüglich der Dauerhaftigkeit der C-Speicherung (Permanenz) oder des Potenzials, Nährstoffe (und Schadstoffe) anlagern zu können [23] [33] [43] [58] [66].

Eine Studie zeigte ein erhöhtes Pflanzenwachstum nach der Ausbringung von PK, deutete jedoch auch darauf hin, dass die Pflanzen einen geringeren Schutz vor Insekten- und Pathogenbefall sowie Stressfaktoren wie Trockenheit aufweisen könnten [69].

Ob eine Änderung der Albedo⁵ der Böden durch PK-Gabe den Wärmehaushalt entscheidend zu ändern vermag, ist bei kleinen PK-Mengen und, weil ohnehin eine möglichst durchgehende Bodenbedeckung angestrebt werden sollte, vermutlich weniger zu befürchten [38] [55].

Überdies gebieten es die schlechte Datenlage und fehlende Erfahrungswerte, gemäss dem Vorsorgeprinzip mögliche nachteilige Entwicklungen zu antizipieren und auszuschliessen.

3.4 Potenzial für die Speicherung von Kohlenstoff (C) und finanzielle Wirtschaftlichkeit

Gemäss den Vorgaben (siehe Kapitel 2) ist der Einsatz von PK nur sinnvoll auf von Menschen genutzten Landwirtschafts- und Siedlungsböden. Für die Schweiz schätzen Schmidt et al. (2021) ausgehend von holzartigem Ausgangsmaterial ein – zeitlich begrenztes – C-Speicherungspotenzial mittels PK für Flächen, die gedüngt werden dürfen (Acker-, Weideland und Alp sowie Obst-/Reb-/Gemüsebau) von 0.90–1.16 Mt CO₂ pro Jahr [31] [60] [64]. Die Autoren ordnen ein, dass diese Menge (350'000 t PK), als nachhaltiges, zusätzlich nutzbares Potential gemäss Thees et al. (2017) [64], heute verfügbar wäre. Keel et al. [48] schätzen ebenso für die Schweiz aber ausschliesslich für Ackerland und für ein Szenario, in dem nur Biomasse aus der Landschaftspflege genutzt wird, das Potenzial auf 0.14 Mt CO₂ pro Jahr; in einem Szenario, in dem zusätzlich Energieholz niedriger Qualität, Grünabfälle aus Haushalten und naturbelassenes Abfallholz eingesetzt werden, auf 0.73 Mt CO₂ pro Jahr.⁶

Um 1 t CO₂ mittels PK in Böden zu speichern, werden ungefähr 0.4 t EBC-zertifizierte PK benötigt. Da die Zahlungsbereitschaft für negative Emissionen begrenzt ist (ca. 100–200 CHF/t CO₂)⁷ und die Produktionskosten hoch sind (ca. 300–750 CHF/t PK) [56] ist das Speichern von C über PK im Boden heute nicht wirtschaftlich rentabel. Der Marktpreis für 1 t PK liegt heute bei ungefähr 1000 CHF. Selbst wenn Landwirte mit einem langfristig fallenden Preis auf ungefähr 500 CHF/t rechnen, lohnen sich die Kosten für die Ausbringung auf Äcker nicht, solange der Verkauf von Zertifikaten die einzige finanzielle Ertragsquelle darstellt und die Zahlungsbereitschaft für gespeichertes CO₂ nicht deutlich steigt.

Die Wirtschaftlichkeit der Pyrolyseanlagen kann erreicht werden durch die Kombination der Erlöse aus Pflanzenkohle, Wärme, evtl. Stromerzeugung und Zertifikaten für die Klimawirkung. Die gewonnene Wärmeenergie wird z.B. für Fernwärme genutzt, wie dies für verschiedene Anlagen beispielsweise in Basel, Flaach oder Frauenfeld bereits der Fall ist [26] [28] [41].

Eine wichtige Überlegung ist, ob die Produktion und Anwendung von PK in Betracht der gesamten Energie- und Stoffkreisläufe ökologisch sinnvoll ist [51] [53] [73]. Durch die zusätzliche Verwendungsoption als PK könnten Nutzungskonflikte bezüglich organischer Reststoffe entstehen oder verschärft werden. Eine Subventionierung der PK könnte zu Landnutzungsänderungen führen, wenn Biomasse für die PK Herstellung angebaut wird anstatt für die Nahrungsmittelproduktion. Eine solche Praxis widerspräche der Biomassestrategie der Schweiz und muss verhindert werden.

Bedenklich ist auch eine mögliche Umlenkung organischer Stoffströme, wenn beispielsweise von einer Fläche über längere Zeit Stroh für die PK-Produktion entfernt wird, aber nicht durch das Einbringen

⁵ Die Albedo ist ein Mass für das Rückstrahlvermögen von diffus reflektierenden, also nicht selbst leuchtenden Oberflächen.

⁶ Alternativ könnte ein Teil der Biomasse anderweitig, ausserhalb der Landwirtschaft eingesetzt werden: Keel et al. (2021) [47] schätzen für technische Böden in Siedlungsgebieten (Stadt bäume) 0.21 Mt CO₂ pro Jahr; für neu gebaute Strassen 0.24 Mt CO₂ pro Jahr.

⁷ Als maximale Zahlungsbereitschaft für ein Kompensations-Projekt (Sanktion Art. 28 CO₂-Gesetz + Auslands-Bescheinigungen) werden 200 CHF/t CO₂ angenommen. [3] [11]

anderen organischen Materials ausgeglichen wird. Die C-Anreicherung mittels PK auf einer Fläche würde so mit einer C-Abreicherung auf der anderen Fläche einhergehen.

Für eine Berechnung der klimawirksamen negativen Emissionen ist es wesentlich, die Gesamtbilanz (CO₂-Entzüge aus der Atmosphäre gegen Treibhausgasemissionen in die Atmosphäre) zu berücksichtigen. Hierzu zählen unter anderem Anbau der Biomasse, Transporte und Pyrolyse bis zur Festlegung der PK in einer nicht brennbaren Form und der Verlust des labilen Anteils der PK in Böden an die Atmosphäre [63] [65]. Alle anfallenden Emissionen sind vom Speicherungspotenzial abzuziehen. Die Wahl und Berücksichtigung einer integren Systemgrenze ist für eine korrekte Ausweisung der Klimawirksamkeit zentral.

Auch lohnt ein Vergleich: Das genannte jährliche Potenzial der C-Speicherung durch PK ist den Emissionen aus drainierten organischen Böden der Schweiz in Höhe von circa 0.69 Mt CO₂ im Jahr 2019 ähnlich [37], wobei diese nur ungefähr 3% der Landwirtschaftsfläche einnehmen. Die Wiedervernässung landwirtschaftlich genutzter organischer Böden kann, jedoch mit Ertragsausfällen, einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz leisten, indem die Emissionen aus der Torfmineralisierung gestoppt oder minimiert werden und der verbliebene Kohlenstoff erhalten bleibt.

3.5 Forschungsbedarf

Aus den dargelegten Überlegungen leitet sich Forschungsbedarf ab. Einerseits werden langfristige Feldversuche mit PK unter praxistauglichen und üblichen, landestypischen Bedingungen benötigt, die das System Boden, Klima, Energie-, Kohlenstoff- und Nährstoffhaushalt möglichst vollständig abbilden. BAFU und BLW unterstützen deshalb erste Langzeitstudien mit PK (z.B. «Black goes Green») [35] [36]. Andererseits müssen diese mit kohärenten Ökobilanzstudien ergänzt werden [43] [53] [73]. Erst wenn solche Anstrengungen vereint und auch anderen Stoffströmen und Kaskadennutzungen vergleichend gegenübergestellt werden, sind Aussagen möglich, welche Nutzungssysteme sich als erstrebenswert herauskristallisieren. Gleichzeitig dürfen diese nur umgesetzt werden, wenn ein Eintrag und die Anreicherung von Schadstoffen ausgeschlossen werden kann.

4 Folgerungen und Anwendungsempfehlungen für den Einsatz von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft

Insbesondere aus Gründen des Bodenschutzes soll PK in der Landwirtschaft nur eingesetzt werden, wenn relevante Bodenparameter auf der Zielfläche bekannt sind und ein Bedarf bezüglich der Nährstoffverfügbarkeit oder des Wasserhaushalts ausgewiesen wurde. Die verwendete PK muss dabei den Vorgaben in Kapitel 2 gerecht werden und soll nur in kleinen Raten ausgebracht werden. Es sollten nur naturbelassene Reststoffe (z.B. Baumschnitt) pyrolysiert und die PK in einer Kaskade verwertet werden: PK in geeigneter Qualität kann zunächst Viehfutter⁸ beigemischt oder als Einstreu im Stall verwendet werden [24] [25] [60]. Um eine direkte, förderliche Wirkung auf die Nährstoffversorgung zu haben, muss die PK vor dem Ausbringen mit Nährstoffen «beladen» werden. Dazu wird sie beispielsweise mit Kompost, Dünger oder Gülle vermischt [67]. Erfahrungswerte zeigen, dass die Ausbringungsmenge mit 0,5–2 t PK pro Hektar (Trockensubstanz, TS) eher klein sein sollte und (jährlich) wiederholt stattfinden kann [60]. Meist wird PK oberflächlich ausgebracht. Es kann auch die konzentrierte Wurzelzonenapplikation angewendet werden, bei der PK punkt- oder streifenförmig unterhalb eines Samens oder eines Setzlings eingebracht wird [60]. Für eine Rate von 1 t PK/ha/a rechnen Schmidt et al. (2021) hoch, dass bis 2050 maximal 30 t PK/ha im Boden verbleiben, und gehen von keiner negativen Auswirkung auf die Bodenqualität aus [60]. Jedoch fehlen langfristige Erkenntnisse, um dies heute zu beurteilen.

Mit Blick auf die Eindämmung des Klimawandels besteht ein starkes Interesse, CO₂ aus der Atmosphäre über PK in Böden langfristig zu speichern. Um dem Vorsorgeprinzip gerecht zu werden, sollte der Einsatz von PK zumindest bei grossflächiger Ausbringung wissenschaftlich begleitet werden. Ertragsdaten und Bodenanalysen, insbesondere hinsichtlich der Permanenz des Kohlenstoffs und der Auswirkungen auf die Bodenbiologie, sollten transparent dokumentiert werden.

Solange schädliche Auswirkungen, beispielsweise auf Bodenlebewesen, nicht ausgeschlossen werden können, wird im Sinne der Vorsorge vom weitflächigen Einsatz von PK auf landwirtschaftliche Böden vorläufig abgeraten.

⁸ Vorgabe: Qualität ist erfüllt gemäss EBC Klasse 1. Praxisberichte deuten bei *nicht* permanenter Gabe auf ein verbessertes Tierwohl hin.

5 Quellen

5.1 Erlasse (Gesetze und Verordnungen)

- [1] **Bundesgesetz über den Natur- und Heimatschutz (NHG):** Gesetz 451 vom 1. Juli 1966 (Stand am 1. Januar 2022), Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1966/1637_1694_1679/de (Zugriff: 14.11.2022)
- [2] **Bundesgesetz über die Landwirtschaft (Landwirtschaftsgesetz, LWG):** Gesetz 910.1 vom 29. April 1998 (Stand am 1. Januar 2022), Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/3033_3033_3033/de (Zugriff: 14.11.2022)
- [3] **Bundesgesetz über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Gesetz):** Gesetz 641.71 vom 23. Dezember 2011 (Stand am 1. Januar 2022), Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/855/de> (Zugriff: 14.11.2022)
- [4] **Bundesgesetz über den Umweltschutz (Umweltschutzgesetz, USG):** Gesetz 814.01 vom 7. Oktober 1983 (Stand am 1. Januar 2022), Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1984/1122_1122_1122/de (Zugriff: 14.11.2022)
- [5] **Bundesgesetz über den Schutz der Gewässer (Gewässerschutzgesetz, GSchG):** Gesetz 814.20 vom 24. Januar 1991 (Stand am 1. Januar 2022), Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1992/1860_1860_1860/de (Zugriff: 14.11.2022)
- [6] **Energiengesetz (EnG):** Gesetz 730.0 vom 30. September 2016 (Stand am 1. Oktober 2022), Die Bundesversammlung der Schweizerischen Eidgenossenschaft. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2017/762/de> (Zugriff: 14.11.2022)
- [7] **Luftreinhalte-Verordnung (LRV):** Verordnung 814.318.142.1 vom 16. Dezember 1985 (Stand am 1. Oktober 2022), Der Schweizerische Bundesrat. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1986/208_208_208/de (Zugriff: 14.11.2022)
- [8] **Verordnung über Belastungen des Bodens (VBBo):** Verordnung 814.12 vom 1. Juli 1998 (Stand am 12. April 2016) Der Schweizerische Bundesrat. https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/1998/1854_1854_1854/de (Zugriff: 14.11.2022)
- [9] **Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngern (Dünger-Verordnung, DüV):** Verordnung 916.171 vom 10. Januar 2001 (Stand am 16. Juli 2022), Der Schweizerische Bundesrat. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2001/105/de> (Zugriff: 14.11.2022)
- [10] **Verordnung über die Produktion und das Inverkehrbringen von Futtermitteln (Futtermittel-Verordnung, FMV):** Verordnung 916.307 vom 26. Oktober 2011 (Stand am 1. Januar 2022), Der Schweizerische Bundesrat. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2011/772/de> (Zugriff: 14.11.2022)
- [11] **Verordnung über die Reduktion der CO₂-Emissionen (CO₂-Verordnung):** SR 641.71 vom 30.11.2012 (Stand am 1. Januar 2023), Der Schweizerische Bundesrat. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2012/856/de> (Zugriff: 18.01.2023)
- [12] **Verordnung zur Reduktion von Risiken beim Umgang mit bestimmten besonders gefährlichen Stoffen, Zubereitungen und Gegenständen (Chemikalien-Risikoreduktions-Verordnung, ChemRRV):** Verordnung 814.81 vom 18. Mai 2005 (Stand am 1. Dezember 2022), Der Schweizerische Bundesrat. <https://www.fedlex.admin.ch/eli/cc/2005/478/de> (Zugriff: 14.12.2022)
- [13] **Verordnung (EU) 2019/1009** des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. Juni 2019 mit Vorschriften für die Bereitstellung von EU-Düngeprodukten auf dem Markt und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 1069/2009 und (EG) Nr. 1107/2009 sowie zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 2003/2003 (Text von Bedeutung für den EWR) <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1009> (Zugriff: 14.11.2022)

5.2 Sachpläne und Vollzugshilfen

- [14] **BAFU 2017:** Aktionsplan Strategie Biodiversität Schweiz. Der Schweizerische Bundesrat, Hrsg.: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/publikationen-studien/publikationen/strategie-biodiversitaet-schweiz.html> (Zugriff 14.11.2022)
- [15] **BAFU 2018:** Klimapolitik der Schweiz. Umsetzung des Übereinkommens von Paris. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Info Nr. 1803: 28 S. <http://www.bafu.admin.ch/ui-1803-d> (Zugriff 14.11.2022)
- [16] **BAFU 2021:** Ressourcenpolitik Holz 2030. Strategie, Ziele und Aktionsplan Holz 2021–2026. Umwelt-Info Nr. 2103: 76 S. <http://www.bafu.admin.ch/ui-2103-d> (Zugriff: 14.11.2022)
- [17] **BAFU 2022:** Webseite «CO₂-Kompensation». <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/verminderungsmassnahmen/kompensation.html> (Zugriff: 14.11.2022)
- [18] **BAFU & BLW 2009:** Biomassestrategie Schweiz – Strategie für die Produktion, Verarbeitung und Nutzung von Biomasse in der Schweiz, Bundesamt für Energie BFE, Bundesamt für Landwirtschaft BLW, Bundesamt für Raumentwicklung ARE, Bundesamt für Umwelt BAFU, Hrsg: BAFU und BLW, 23. März 2009, <https://www.news.admin.ch/newsd/message/attachments/15396.pdf> (Zugriff 14.11.2022)
- [19] **BAFU & BLW 2012:** Nährstoffe und Verwendung von Düngern in der Landwirtschaft. Ein Modul der Vollzugshilfe Umweltschutz in der Landwirtschaft. Bundesamt für Umwelt, Bern. Umwelt-Vollzug Nr. UV-1225: 62 S. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/wasser/publikationen-studien/publikationen-wasser/naehrstoffe-verwendung-duengern-landwirtschaft.html> (Zugriff: 14.11.2022)
- [20] **BFE 2021:** Energiepolitik, Webseite vom 22.09.2021, <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiepolitik.html> (Zugriff: 14.11.2022)
- [21] **BLW, 2020:** Voraussetzungen und Vorschriften für die Bewilligung von Biokohle, 15.06.2020, Bundesamt für Landwirtschaft, Schweiz. www.blw.admin.ch Kontakt: duenger@blw.admin.ch
- [22] **Schweizerischer Bundesrat 2020:** Bodenstrategie Schweiz für einen nachhaltigen Umgang mit dem Boden, Umwelt-Info, 64 S. <http://www.bafu.admin.ch/ui-2018-d> (Zugriff: 14.11.2022)

5.3 Literatur

- [23] **Al-Wabel, M.I. et al. 2017:** Impact of biochar properties on soil conditions and agricultural sustainability: A review. Land Degradation & Development, Volume29, Issue7, Special Issue: Ash and fire, char and biochar in the environment. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2829>

- [24] **Abächerli, F. 2021:** Pflanzenkohle: Lösung für den landwirtschaftlichen Klimaschutz? Vortrag an der AgroCleanTech-Tagung 2021 zu Treibhausgas-Senken in der Landwirtschaft. https://www.agrocleantech.ch/images/Fachleute/Tagungen/2021/2021_PP_Verora_Fredy_Abaecherli_D.pdf (Zugriff 14.11.2022)
- [25] **Agro Clean Tech Verein 2017:** Pflanzenkohleeinsatz in der Landwirtschaft. Einsatzbereiche und Wirtschaftlichkeit von Pflanzenkohle als Klimamassnahme. Juli 2016. Florence Looser AgroCleanTech Verein. https://agrocleantech.ch/images/Fachleute/Wissen/Pflanzenkohleeinsatz_in_der_Landwirtschaft_als_Klimamassnahme.pdf (Zugriff: 14.11.2022)
- [26] **AgroCO2ncept Flaachtal:** Landwirte und Unternehmer aus der Region Flaachtal haben die Initiative ergriffen, um die Machbarkeit des praktischen Klimaschutzes im landwirtschaftlichen Alltag und in der Region aufzuzeigen. <http://www.agroco2ncept.ch/das-projekt/index.html> (Zugriff: 14.11.2022)
- [27] **Amelung, W. et al. 2020:** Towards a global-scale soil climate mitigation strategy, *Nature Communications* 11, 5427, <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18887-7>
- [28] **Bioenergie Frauenfeld:** Im Holzheizkraftwerk wird Biomasse, in Form von Restholz, aus der Region mittels Pyrolyse in Pflanzenkohle umgewandelt. <https://www.bioenergie-frauenfeld.ch/> (Zugriff: 14.11.2022)
- [29] **Borchard, N. et al. 2019:** Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis, *Science of The Total Environment*, 651, 2, 2354–2364, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.10.060>
- [30] **Briones, M.J.I., Panzacchi, P., Davies, C.A., Ineson, P. 2020:** Contrasting responses of macro- and meso-fauna to biochar additions in a bioenergy cropping system, *Soil Biology and Biochemistry*, 145, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107803>
- [31] **Burg, V., Bowman, G., Erni, M., Lemm, R., Thees, O. 2018:** Analyzing the potential of domestic biomass resources for the energy transition in Switzerland. *Biomass and Bioenergy* 111, 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.02.007>
- [32] **Cornelissen, G., Pandit, N.R., Taylor, P., Pandit, B.H., Sparrevik, M., Schmidt, H.P., 2016:** Emissions and Char Quality of Flame-Curtain "Kon Tiki" Kilns for Farmer-Scale Charcoal/Biochar Production. *PLoS ONE* 11(5): e0154617. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>
- [33] **Crombie, K., Mašek, O., Cross, A., Sohi, S. 2015:** Biochar – synergies and trade-offs between soil enhancing properties and C sequestration potential. *GCB Bioenergy*, 7, 1161–1175. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12213>
- [34] **Elliston, T. and Oliver, I. 2020:** Ecotoxicological assessments of biochar additions to soil employing earthworm species *Eisenia fetida* and *Lumbricus terrestris*, *Environmental Science and Pollution Research* 27, 33410–33418, <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04542-2>
- [35] **FIBL 2021a:** Kohle fürs Klima. Das FiBL Schweiz und Grün Stadt Zürich starten den Praxis-Langzeitversuch "Black goes Green" zum Einsatz von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft. Es geht um Klimaschutz und den Wasserhaushalt des Bodens. <https://www.fibl.org/de/infotehk/meldung/kohle-fuers-klima> (Zugriff: 14.11.2022)
- [36] **FIBL 2021b:** Klimawirkung von Recyclingdüngern und Pflanzenkohle: Emissionen von Lachgas, Methan und Ammoniak in einem Feldversuch <https://www.fibl.org/de/themen/projekt Datenbank/projektitem/project/1473> (Zugriff: 14.11.2022)
- [37] **FOEN 2021:** Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2019: National Inventory Report and reporting tables (CRF). Submission of April 2021 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol. Federal Office for the Environment, Bern. <http://www.climate reporting.ch>
- [38] **Genesio et al. 2012:** Surface albedo following biochar application in durum wheat. *Environmental Research Letters* 7 (2012) 014025 (8pp). <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/7/1/014025> (Zugriff 14.11.2022)
- [39] **Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., Zech, W. 2001:** The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88 (1), 37–41. <https://doi.org/10.1007/s001140000193>
- [40] **Glaser, B., Wiedner, K., Seelig, S., Schmidt, H. P., Gerber, H. 2015:** Biochar organic fertilizers from natural resources as substitute for mineral fertilizers, *Agronomy for Sustainable Development*, 35:667–678, <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0251-4>
- [41] **IWB 2021:** Pflanzenkohleanlage – Produktion CO₂-negativer Fernwärme und Pflanzenkohle, Industrielle Werke Basel, <https://www.iwb.ch/ueber-uns/Projekte/Innovationsprojekte/Pflanzenkohleanlage.html> (Zugriff: 14.11.2022)
- [42] **Jeffery, S., Verheijen, F., Kammann, C., Abalos, D. 2016:** Biochar effects on methane emissions from soils: A meta-analysis, *Soil Biology and Biochemistry*, 101, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.07.021>
- [43] **Jeffery, S. et al. 2015:** The way forward in biochar research: targeting trade-offs between the potential wins, *GCB Bioenergy* 7, 1–13, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12132>
- [44] **Jeffery, S. et al. 2017:** Biochar boosts tropical but not temperate crop yields, *Environmental Research Letters*, 12, 5. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa67bd>
- [45] **Khorram et al. 2016:** Biochar: A review of its impact on pesticide behavior in soil environments and its potential applications, *Journal of Environmental Sciences*, 44, 269–279, <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.12.027>
- [46] **Keel, S. 2021:** Landwirtschaftliche Böden als Treibhausgas-Senke. Vortrag an der AgroCleanTech-Tagung 2021 zu Treibhausgas-Senken in der Landwirtschaft. https://www.agrocleantech.ch/images/Fachleute/Tagungen/2021/2021_PP_Agrscope_Sonja_Keel_D.pdf (Zugriff 17.01.2022)
- [47] **Keel, S. G., Johannes, A., Boivin, P., Burgos, S., Charles, R., Hagedorn, F., Kulli, B., Leifeld, J., Saluz, A., Zimmermann, S., 2021:** Soil carbon sequestration in Switzerland: analysis of potentials and measures (Postulate Bourgeois 19.3639). Report by Agroscope. Commissioned by the Federal Office for the Environment, Bern.
- [48] **Keel, S. G., Bretscher, D., Leifeld, J., Ow, A., Wüst-Galley, C.** (eingereicht bei PNAS): Soil carbon sequestration potential bounded by population growth, land availability, food production, and climate change.
- [49] **Lehmann, J., Czimczik, C., Laird, D., Sohi, S. 2009:** Stability of Biochar in the Soil. in J Lehmann & J Stephen (eds), *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan, London, pp. 169–182.
- [50] **Lehmann, J. et al. 2011:** Biochar effects on soil biota – A review, *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 9, 1812–1836, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- [51] **Lehmann, J. et al. 2021:** Biochar in climate change mitigation, *Nature Geoscience* 14, 883–892, <https://doi.org/10.1038/S41561-021-00852-8>
- [52] **Liesch et al. 2010:** Impact of Two Different Biochars on Earthworm Growth and Survival, *Annals of Environmental Science*, 4, 1–9, <http://hdl.handle.net/2047/d20000234>
- [53] **Matušík, J., Hnátková, T., Kočí, V. 2020:** Life cycle assessment of biochar-to-soil systems: A review, *Journal of Cleaner Production* 259, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120998>
- [54] **Maurer & Stäger AG 2021:** Rechtlicher Umgang mit Pflanzenkohle, Gutachten im Auftrag des BAFU, 15. Februar 2021, Dr. iur. et dipl. chem. Hans Maurer, Rechtsanwalt
- [55] **Meyer, S., Bright, R. M., Fischer, D., Schulz, H., Glaser, B. 2012:** Albedo Impact on the Suitability of Biochar Systems To Mitigate Global Warming, *Environmental Science & Technology*, 46, 22, 12726–12734, <https://doi.org/10.1021/es302302g>

- [56] **Prognos und Infras 2021:** Energieperspektiven 2050+, Exkurs Negativemissionstechnologien und CCS. Potenziale, Kosten und Einsatz. 7. September 2021, aktualisiert 19. November 2021, Studie im Auftrag des Bundesamts für Energie, BFE. <https://t1p.de/EP2050NET> (Zugriff: 14.11.2022)
- [57] **Reisser, M., Purves, R.S., Schmidt, M.W.I., Abiven, S. 2016:** Pyrogenic Carbon in Soils: A Literature-Based Inventory and a Global Estimation of Its Content in Soil Organic Carbon and Stocks. *Front. Earth Sci., Sec. Biogeoscience*, <https://doi.org/10.3389/feart.2016.00080>
- [58] **Rodrigues, L., Budai, A., Elsgaard, L., Hardy, B., Keel, S.G., Mondini, C., Plaza, C., Leifeld, J.** (eingereicht bei Environmental Science & Technology): The importance of biochar quality and pyrolysis yield for soil carbon sequestration in practice.
- [59] **Schimmelpfennig, S. and Glaser, B. 2012:** One Step Forward toward Characterization: Some Important Material Properties to Distinguish Biochars. *J. Environ. Qual.*, 41, 4, 1001–1013, <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0146>
- [60] **Schmidt, H.P., Hagemann, N., Abächerli, F., Leifeld, J., Bucheli, T. 2021:** Pflanzenkohle in der Landwirtschaft – Hintergründe zur Düngertilgung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. *Agroscope Science*, 112, 2021, 1–71. DOI: <https://doi.org/10.34776/as112g>
- [61] **Schweizerischer Bundesrat 2020:** Von welcher Bedeutung könnten negative CO₂-Emissionen für die künftigen klimapolitischen Massnahmen der Schweiz sein? Bericht des Bundesrates in Erfüllung des Postulates 18.4211 Thorens Goumaz vom 12. Dezember 2018. Bern, 2. September 2020. <https://www.parlament.ch/centers/eparl/curia/2018/20184211/Bericht%20BR%20D.pdf> (Zugriff: 14.11.2022)
- [62] **Stockholm Biochar Project 2019:** Das Stockholmer Biokohle-Projekt verwendet Park- und Gartenabfälle zur Herstellung von erneuerbarer Energie und Pflanzenkohle, welche in Gärten, Stadtparks und Pflanzbeeten zum Einsatz kommt. <https://www.hamk.fi/wp-content/uploads/2019/04/Mattias-Gustafsson-pieni.pdf> (Zugriff: 14.11.2022)
- [63] **Tanzer and Ramírez 2019:** When are negative emissions negative emissions? *Energy and Environmental Science*, 4, <https://doi.org/10.1039/C8EE03338B>
- [64] **Thees, O., Burg, V., Erni, M., Bowman, G., Lemm, R. 2017:** Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET. WSL Berichte: Vol. 57. Birmensdorf: Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL. <https://www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:13277> (Zugriff: 06.01.2022)
- [65] **The European Biochar Certificate (EBC) and Positive list of biomass feedstock.** Version 10.1 vom 10.01.2022. <https://www.european-biochar.org/en/ct/2-EBC-guidelines-documents-for-the-certification> (Zugriff: 14.11.2022)
- [66] **Thünen Institut 2022:** Ergebnisse des Projekts Pflanzenkohle in der Landwirtschaft 2010–2015, Einsatz von Kohlen aus der Pyrolyse und der hydrothermalen Carbonisierung in der Landwirtschaft, Zusammenfassung auf der Webseite: <https://www.thuenen.de/de/fachinstitute/agrarklimaschutz/projekte/pflanzenkohle-in-der-landwirtschaft> (Zugriff 14.11.2022)
- [67] **UBA 2016:** Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden, Texte 04/2016, Umweltbundesamt Deutschland. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/chancen-risiken-des-einsatzes-von-biokohle-anderer> (Zugriff: 14.11.2022)
- [68] **Verenum 2020:** Nussbaumer, T., Lauber, A., Zotter, P., 2020: Anlagen zur Vergasung und Verkohlung von Holz und anderer fester Biomasse, Grundlagen und Empfehlungen zum Vollzug der Luftreinhalte-Verordnung, im Auftrag der Kantone Aargau, Graubünden und Bern, Verenum AG, Zürich, 14.09.2020. <https://t1p.de/verenum2020> (Zugriff 14.12.2022)
- [69] **Viger, M., Hancock, R.D., Miglietta, F., Taylor, G. 2015:** More plant growth but less plant defence? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar. *Bioenergy*, 7, 4, 658–672, <https://doi.org/10.1111/gcbb.12182>
- [70] **Wahlen, J.K., Benslim, H., Elmi, A.A., Husk, B.R. 2021:** Earthworm populations are stable in temperate agricultural soils receiving wood-based biochar. *Pedosphere* 31(3): 398–404. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(20\)60080-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(20)60080-7)
- [71] **Wagg C., Bender F., Widmer F., van der Heijden M. 2014:** Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 14, 5266–5270. <https://doi.org/10.1073/pnas.1320054111>
- [72] **Woelf, D., Lehmann, J. 2012:** Modelling the long-term response to positive and negative priming of soil organic carbon by black carbon. *Biogeochemistry* (2012) 111:83–95, <https://doi.org/10.1007/s10533-012-9764-6>
- [73] **Woelf, D., Lehmann, J. Lee, D. 2016:** Optimal bioenergy power generation for climate change mitigation with or without carbon sequestration. *Nature Communications* 7, 13160. <https://doi.org/10.1038/ncomms13160>
- [74] **Ye L. et al. 2020:** Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use Manage* 36:2–18. <https://doi.org/10.1111/sum.12546>