

# Carbo-Mob: mobile Verkohlung für Restschnittgut aus Landschaftspflege, Wein- und Obstbau

Dez 2011 – Feb 2014



## **Bearbeitung:**

Nachhaltigkeits-Projekte: Dr. Carola Holweg

## **Finanzierung (Projekt 2011-12/2013-13):**

50 % Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz badenova  
50 % Eigenfinanzierung



*Energie. Tag für Tag*

## INHALTSVERZEICHNIS

- 1. Motivation „mobile Verkohlung“**
- 2. Einführung in die Thematik und gewählte Karbonisierungstechnik**
- 3. Die Entwicklung zum Carbo-Mob**
  - 3.1. Zieldefinition mobiler Verkohlung
  - 3.2. Verwendung von BiGchar 1000 als zentralem Verkohlungssofen
  - 3.3. Thermische Nachverbrennung
  - 3.4. Maßnahmen, um geringes Gewicht und leichte Handhabung zu erhalten
  - 3.5. Schnittgut-Vortrocknung - *ein Spagat von Temperatur, Zeit und Raum*
  - 3.6. Übergangslösung für den Kohleausstrag: Metalltröge
  - 3.7. Sicherheitsvorkehrungen
  - 3.8. Tauglichkeit im Straßenverkehr
- 4. Erfahrungen mit diversem Schnittgut**
  - 4.1. Flexibilität des Etagenofens bei unterschiedlichem Häckselgut
  - 4.2. Anpassungsmöglichkeiten der Schnittgutfeuchte
- 5. Umweltverträglichkeit von Produktionsprozess und Kohleprodukten**
  - 5.1. Allgemeine verbrennungstechnische Merkmale für Holz und Schnittgut
  - 5.2. Faktoren der Ausgangsbiomasse, die die Abgassituation verschlechtern
  - 5.3. Besondere verbrennungstechnische Merkmale des verwendeten Ofens
  - 5.4. Emissionen flüchtiger Verbrennungsgase
    - 5.4.1. Abgassituation bei der *offenen Verbrennung* von Biomasse
    - 5.4.2. Abgassituation bei Carbo-Mob mit integrierter BiGchar 1000
    - 5.4.3. Gasfreisetzung bei Carbo-Mob im Vergleich zu anderen Feuerstätten
  - 5.5. Umweltverträglichkeit der Pflanzenkohle
    - 5.5.1. Prüfung auf Inhaltstoffe und mögliche Schadstoffe
    - 5.5.2. Biotests zur Prüfung der Verträglichkeit der Kohlen bei Pflanzen
    - 5.5.3. Einschätzung von Risiken hinsichtlich des Schnittguts
- 6. Bewertung ökologisch-ökonomischer Kriterien**
  - 6.1. Ökonomische Bewertung/Diskussion am Fallbeispiel Stockrodung im Weinbau
  - 6.2. Ökologische Bewertung/Diskussion am Fallbeispiel Naturschutz
- 7. Rechtliche Rahmenbedingungen**
  - 7.1. Rahmenbedingungen für Abgaswerte
  - 7.2. Rahmenbedingungen für die Verwendung von Pflanzenkohlen
  - 7.3. Mögliche Regelung des Nutzerrahmens
  - 7.4. Frage des Nutzerrahmens einer Carbo-Mob-Anlage
- 8. Argumente für/gegen die Umsetzung mobiler Verkohlung**

Vermeidung der Schadstoffsituation offener Verbrennung • Kategorisierung nach Anlagenklassen und Begriff „Abfall“ fraglich • bessere Ressourcennutzung • Phytohygiene • keine Konkurrenzrisiken
- 9. Zusammenfassung und Ausblick**

Literaturliste, Anhang: Bildtafeln

*„Die Dinge sind nie so, wie sie sind. Sie sind immer das, was man aus ihnen macht“*

Jean Anouilh (1910-1987), französischer Dramatiker

### *Danksagung*

*Die unten beschriebene Problemstellung und der vorgeschlagene Lösungsweg für „Schnittgut aus landschaftlichen Pflegesituationen“ interessierten mich, und es fanden sich Fördermittel und obendrein Menschen und Fachleute in der Region, die mich bei der Verwirklichung einer fahrbaren Verkohlung zur besseren Verwertung von Schnittgut unterstützten.*

*Aus zwei Jahren Studien- und Entwicklungsarbeit zum „Carbo-Mob“ liegen nun Ergebnisse vor, die Anlass geben, die Spur weiter zu folgen.*

*Dank gilt zuvorderst der australischen Firma BiG (J. Joyce). Sie stellte den Verkohlungsofen „BiGchar“, den wir in die Anlage einbauten. Auf die Technik hatte mich 2010 ein langjähriger Biokohle-Freund und Praktiker (A. Thomsen, Kenzingen) hingewiesen.*

*Besonderen Dank auch an C. Gminder (Prantner Verfahrenstechnik GmbH, Reutlingen) für alle Beratung und technischen Input bei der Anpassung des Nachverbrenners. Dank an M. Kiss (Lohnunternehmen im Weinbau, Ihringen) für die Versorgung mit Weinstockschnitzel und an findige Menschen aus dem Metallhandwerk (wie T. Mössinger, Merzhausen/Weisweil).*

*Es war wichtig, auf Menschen zu treffen, die für ungewöhnliche Wege offen waren, ja nicht einmal Halt machten vor technischen Zeichnungen, die freihändig und mit Buntstift skizziert waren ... weil nämlich eines klar war: es ging zunächst darum, ein Prinzip zu testen.*

*Vielen Dank dem Sachverständigenbeirat des badenova Innovationsfonds für die Unterstützung der Idee und vor allem den näheren Gesprächspartnern des Innovationsfonds für die verlässliche Kommunikation.*

*Carola Holweg*

*Merzhausen, den 8. Mai 2014*

## 1. Motivation „mobile Verkohlung“

Der Erhalt der Landschaft und die Pflege von Flächen in Naturschutz, Weinbau und anderen Kulturen verursacht oft Schnittgutmengen, die von der Fläche entfernt werden müssen, für die es aber keine gute Verwendung gibt. Obwohl das Material in vielen Biomasse-Potenzialstudien als nutzbares Segment für die Kompostierung oder thermische Nutzung ausgewiesen wird, unterbleiben solche Verwertungen – dies trotz verbesserter Heiz- oder Biogas-Technologie. Erst bei näherer Betrachtung der Umstände ergeben sich genauere Hinderungsgründe. Diese liegen am Standort, dem jeweiligen Aufkommen oder am Material selbst.

Für den Naturerhalt besonderer Flächen und für die Offenhaltung der Landschaft muss die Vegetation im Jahresturnus gepflegt und Aufwuchs entfernt werden. Zur aufwendigen Arbeit, das Material von der Fläche zu holen, kommen der Transportaufwand und oft hohe Abgabegebühren am Schnittgutplatz, sodass die Pflege mit immer höheren Kosten verbunden ist. Wo offenes Verbrennen erlaubt ist, wird daher oft zum Lösungsweg *Feuer* gegriffen. Zwar scheint das Problem schnell behoben, aber es gehen dadurch nicht nur wertvolle Ressourcen verloren, sondern gelangen Feinstaub und flüchtige, oft klimawirksame Verbrennungsprodukte ungehindert in die Atmosphäre. Dies ist durch meist zu hohe Wassergehalte verschärft, da Platz und Zeit zur Trocknung fehlen.

Die Problematik fehlender Lager- und Trocknungsplätze stellt sich auch in vielen, oft entlegenen, Kulturflächen von Wein und Obst (auch Streuobstwiesen). Obwohl vor der Neuanlage von Kulturen aus der Strockrodung viel Material entsteht (vor allem im Weinbau), das hohe Energiedichten und damit gute Voraussetzungen für die Verbrennung hat, bedeutet das Abräumen und Verwerten der alten Stöcke für Lohnunternehmen offenbar einen so hohen Aufwand, dass sich durch die fehlende Nachfrage am Hackschnitzelmarkt keine entsprechende Kostenkompensation ergibt. Das Schnittgut fällt zu sporadisch an und ist für die Weiterverarbeitung durch krummen Wuchs, Erdanhaftungen und Verunreinigungen durch Metall und Steine oft schwierig. Bei weiten Anfahrten zum nächsten Biomasse-Werk, das tolerant genug für solches Material wäre, wird auch hier der Kostenaufwand sehr hoch, sodass oft nach besseren Verwertungsmöglichkeiten gesucht wird.

In neuerer Zeit rückte die Verkohlung als alternativer Verwertungsweg für Restbiomasse ins Blickfeld. Für Holzkohle stieg außerdem das Interesse, weil sie aufgrund neuer Erkenntnisse als Hauptgrund für die Bodenfruchtbarkeit der schwarzen Erde am Amazonas (*Terra preta*<sup>1</sup>) gesehen wird. Mittlerweile ist Pflanzenkohle (allg. Biokohle, *engl.* Biochar) nicht nur ein gefragtes Produkt für viele Hobbygärtner, sondern wird auch in der Landwirtschaft vermehrt experimentiert. Auch sonst hat sie vielfältige und teilweise sehr neue Verwendungen, von Brennstoff bis hin zur tierhygienischen Ernährung oder Güllezusatz.

So stellte sich die Frage, ob manches Schnittgut gleich *vor Ort* zu Pflanzenkohle verarbeitet werden könnte. Durch die Verkohlung verringern sich Gewicht und Volumen, was zu Arbeitserleichterungen und Transportersparnissen führen könnte. Bei guten Vermarktungsmöglichkeiten für die Kohle könnte so eine bessere Wertschöpfung für das Pflegegut und Kostenkompensation für die Arbeiten erreicht werden.

<sup>1</sup> **Terra Preta do Indio** (*portug.* schwarze Erde): darunter werden dunkle, fruchtbare, oft meterhohe Bodendecken gefasst, die an vielen Stellen im Amazonasbecken gefunden wurden; erst in den letzten 30 Jahren wurden sie als Zeugnis für Bodenameliorationen präkolumbianischer Zeit erforscht und entstanden vermutlich durch spezielle Verrottungsprozesse von Abfällen (Exkrememente, Küchenabfälle usw.) unter Beimengungen von Holzkohle; ähnliche Bodenformationen, aber nicht anthropogenen Ursprungs sind Czernozems, Schwarzerdeböden wZB. in der Ukraine); für Holzkohle werden derzeit mehrere Schlüsselfaktoren für eine bodenverbessernde Wirkung postuliert.

## 2. Einführung in die Thematik und gewählte Karbonisierungstechnik

Derzeit werden unterschiedliche Techniken zur Biomasse-*Karbonisierung* entwickelt, die *Pflanzkohlen* ganz unterschiedlicher Art hervorbringen. Die jeweilige Nutzbarkeit dieser Produkte muss eigens festgestellt und kritisch hinterfragt werden. Die Systeme können sehr unterschiedlich sein. Unter *Pyrolyse* versteht man grundsätzlich einen physikalisch-chemischen Vorgang beim Abbau von Biomasse durch Verbrennung, bei der aber die vollständige Oxidation durch gezielte Sauerstoffarmut unterbunden wird. Je nach Verfahren und Auslegung der Brennräume, des Biomasseeintrags und des Luft-Gasaustrags entstehen außer dem Pyrolysegas unterschiedliche Anteile von „Nicht-Verbranntem“ wie Koks und **Holzkohle**. Bei Holzvergasern ist die Auslegung so, dass möglichst viel nutzbares Gas entsteht. Dagegen werden die Prozessparameter bei der Holzkohleproduktion in Richtung größtmöglicher Kohle-Ausbeute gelenkt. Die gezielte Herstellung von Pflanzkohlen läuft bei Temperaturen von 350 – 650° C. Ausgangsmaterial ist meist Holzartiges, sodass *Holzkohle* als Produktbezeichnung meist zutrifft, aber auch oft die Begriffe ***Pflanzkohle*** oder ***Biokohle*** anzutreffen sind. In jedem Fall ist das Ergebnis ein fester, großscherbiger oder granulärer *Kohlen-Stoff*, der sehr langlebig ist und dessen Oberfläche in mikroskopischer Auflösung noch einzelne Zellwände des pflanzlichen Ausgangsmaterials erkennen lässt (Bildtafel 1-1, 1-2).

Die Produktion von Pflanzkohle kam erst in den letzten Jahren auf und ist eng verbunden mit dem aufkommenden Interesse für das Prinzip ***Terra preta*** (Ref. 1). In Deutschland wurde das Drehrohrpyrolyseverfahren *Pyreg* (Ref. 2, ursprünglich mit der FH Bingen zur emissionsarmen Klärschlammbehandlung entwickelt) immer mehr als Verkohlungssofen diverser Biomassen mit anschließender Verwendung der Biokohle nachgefragt. Das stationär anwendbare System war schon Gegenstand einer früheren Studie, die ebenfalls von badenova Innovationsfonds unterstützt wurde (Ref. 3). Gefragt war die Machbarkeit der Rückspeisung von Wärmeenergie aus der Verkohlung von Restbiomasse einer Soja-Lebensmittelverarbeitung bei Freiburg. Die Fa. Pyreg hat mittlerweile mehrere Anlagen in Betrieb, darunter Standorte in der Schweiz, Österreich und Deutschland. Ein weiteres Verkohlungssystem aus Deutschland mit der Ausrichtung „Pflanzkohle“ (Fa. *BioMaCon*) findet derzeit in einem Stoffkreislauf-Projekt des Botanischen Gartens Berlin Anwendung (Ref. 4). Die Frage, die beiden deutschen Systeme in die vorliegende Studie einzubeziehen, stellte sich jedoch nicht. Eine Kapazität von ca. 500 bis 1500 Jahrestonnen Biomasse TM (Trockenmasse), verbunden mit hohem Gewicht sowie aufwendiger Regeltechnik, stand nicht nur dem vorgenommenen Ziel der Mobilität, sondern auch den Investitionskosten im Anwenderrahmen entgegen.

Als zentrale Verkohlungseinheit für die vorliegende Projektidee konnte aber ein Modell eines Etagenofens der Bauart **BiGchar** (Fa. BiG, Black is Green) verwendet werden (Abb. 1, Ref. 5). Durch die offene Bauweise handelt es sich streng genommen nicht um einen „Pyrolyseofen“, sondern müsste viel zutreffender als „zonierte Verbrennung von Schnittgut auf ausgedehnter Fläche unter ständigem Entzug verkohlter Partikel und unter geregelter Luftabzug“ beschrieben werden. Durch die offene Auslegung des Ofens wird die Ausbildung von *Schwelbränden* unterbunden. Schwelbrände sind oft problematisch aufgrund der Bildung organischer Schadstoffe.

Der für BiGchar typische Verkohlungsprozess, der sich **vollständig aus der Verbrennungsenergie des Schnittguts** speist, ergibt sich aus dem speziellen, vertikalen und horizontalen Aufbau und der Beweglichkeit im Ofeninneren. Hierzu gehören die Mehrbödigkeit, Durchfallschlitze für Partikel sowie drehbare Wischarme. Das ins oberste Fach eingeförderte Schnittgut entzündet sich, wird

aber beim kontinuierlichen, etagenweisen Weiterschleusen nur so weit abgebrannt, dass gebildete Kohlepartikel ausgetragen werden bevor die Oxidation weiterläuft. Dies geschieht in erstaunlich effizienter Weise. Theoretisch benötigt ein Holzpartikel im verwendeten Ofen nur 90 sec, um als Kohlestück anzukommen. Praktisch verlängert sich der Zeitraum, weil die Wischarme mit 2 – 4 Umdrehungen pro Minute nicht sämtliche Partikel pro Umdrehung und Etage erfassen. Dennoch bleibt die Zeit bis zum Ausschleusen als Kohle-Partikel im Minutenrahmen. Die Idee für BiGchar-Öfen hatte ihren Ursprung in Australien angesichts massenhaft liegendegebliebener Reste abgeernteter Zuckerrohrfelder, die offen abgebrannt werden.

**Karbonisierung** ist gleichbedeutend mit Verkohlung (Carbon = Kohlenstoff). Da der Begriff *Biokohle* (engl. *biochar*) auch für die sehr neue und andersartige Verkohlungstechnik *hydrothermale Carbonisierung* (HTC) verwendet wird, soll diese Technik kurz umrissen werden. Biomasse wird hier über mehrere Stunden hinweg in einem Reaktor bei 20 bar Druck und 80 %-wässriger Umgebung bei ca. 200° C gehalten. Die Karbonisierungsprodukte unterscheiden sich stark in Zusammensetzung und Struktur von den oben beschriebenen Verkohlungsprodukten. Zellverband und höhermolekulare Strukturen der Biomasse werden hier vollständig aufgelöst und zu niedermolekularen Verbindungen abgebaut. Die entstehende schlammige Masse muss gefiltert und getrocknet werden um als Biokohle-Staub oder Pressling weiterverarbeitet werden zu können (z.B. energetisch).

### 3. Die Entwicklung zum Carbo-Mob

#### 3.1. Zieldefinition mobiler Verkohlung

**Mobil** im Sinn der Projektidee ist klar zu unterscheiden von transportfähig (engl. *translocatable*). Bei Anlagen anderer Art wird zwar oft von Container-Anlagen gesprochen, die leicht verfrachtet werden können. Diese stehen aber einer orts- und zeitflexiblen Arbeitsweise allermeist entgegen. Mit **Mobilität** sind Eigenschaften gemeint, von einer zur anderen Tageshälfte den Betriebsstandort zu wechseln, schnell einsatzfähig zu sein und schwerer zugängliche Standorte wie Weinberglandschaften und Naturschutzflächen erreichen zu können.

Das Projekt sollte hierfür wichtige funktionale Voraussetzungen schaffen, darunter *Straßentauglichkeit, geringes Gewicht, Sicherheit und Flexibilität sowie leichte Handhabung bzw. Bedienung*. Gleichzeitig galt es, die geforderten Emissionsstandards zu erreichen.

Die Grundfrage war, die Komponenten *Schnittgutbehandlung, Fördertechnik, Kohleaustrag und Abgasregelung* so zusammenzubringen, dass ein nahezu **täglich wechselnder**, aber nach Startzeitpunkt **kontinuierlicher** Betrieb möglich ist. Der Gesamtvorgang sollte so **flexibel** und **leicht** wie möglich zu handhaben sein und dennoch mit **geringer Automatisierung** auskommen. Aufgrund des Zielanwenderrahmens war von Beginn an klar, dass zu hohe Anlagekosten ohne Aussicht auf Umsetzung wären. Bei der Planung wurde daher darauf geachtet, die Schusslinie „Kosten“ bewusst niedrig zu halten. Einen Bärenanteil der Entwicklungskosten nahm jedoch die Frage der **Abgasbehandlung** ein. Andere Kostenpunkte wie die **Schnittgut-Vortrocknung** fielen eher gering aus. Freilich wäre bei Antragstellung auch eine erhöhte Rückstellung für nicht vorhersehbare Reparaturen sinnvoll gewesen. So fehlten in manchen Bereichen Zeit, Kraft oder Geld für Verfeinerungen oder vollständige Umsetzungen.

Nicht Ziel des Projekts waren Optimierungen des VerkohlungsOfens BiGchar1000 selbst. Die Ofentechnik, die der Projektleitung als Erfindung der australischen Fa. BiG zur Verfügung stand und in diesem Sinn geschützt ist, stellte sich als **zweckdienlich** und genügend **robust** heraus bei gleichzeitig **hocheffizienter Produktionsrate** von Pflanzenkohle. Zudem war der Anlagentyp der einzig bekannte, der den Anforderungen des Projekts gewachsen schien. Von der gesamten Handhabung her stellte sich auch bald ein sicheres Gefühl ein und ging ohne Verletzungen einher

Sich auf diese Vorteile zu beziehen ermöglichte, den Kern der Projektidee, nämlich tatsächliche Anwenderfragen, vorrangig zu behandeln. Verbesserungsvorschläge für die Ofenkonstruktion (wie hier und da von Besuchern geäußert) erwiesen sich entweder als marginal oder waren schon vom Hersteller selbst getestet worden. Ausnahmen waren das Heraussetzen des Achsenlagers und Motors zum besseren Hitzeschutz.

Im Folgenden sind die im Projekt erarbeiteten Lösungen für die **wichtigsten technischen Merkmale** dargestellt, die die gesetzten Ziele **einer mobilen Verkohlungsanlage** weitgehend erfüllen. Sie sind das Ergebnis aus vielen Asätzen und Einzellösungen, manchmal aus mehreren Anläufen. Zum Teil wurden auch Materialien und Lösungswege einbezogen, die an dieser Stelle nicht so leicht zu erwarten waren.

### 3.2. Verwendung von BiGchar 1000 als zentralem Verkohlungssofen

Allgemeine Angaben zum Ofensystem BiGchar siehe Ref. 5. Die verwendete BiGchar1000 (Abb. 1) mit einem Durchmesser von 1 m und einer Höhe von ca. 160 cm besteht aus fünf Etagen (Decks, Fächer), die durch vier Böden (Roste) getrennt sind. Die Roste tragen Aussparungen zum Durchlass von Schnittgut- und Verkohlungspartikel. Die Schnittgutförderung über die Roste erfolgt mit Hilfe von Wischern (an Ketten hängende Metallriegel, die an Armen einer drehenden Mittelachse montiert sind). Während der Bewegung fällt Biomasse nach unten, während Abgase nach oben abziehen. Die BiGchar wurde mit Ummantelung angeliefert und eingebaut (s. Funktionsbild FB\_A).

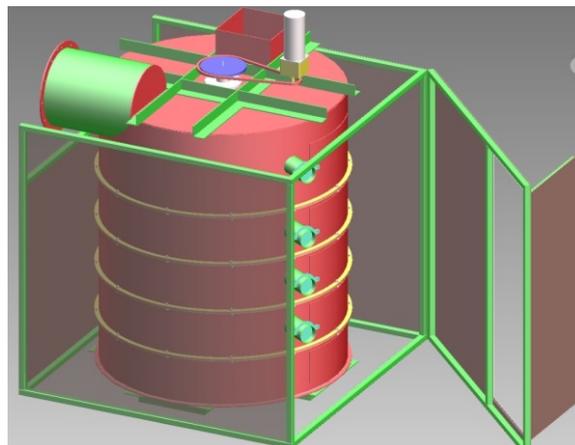
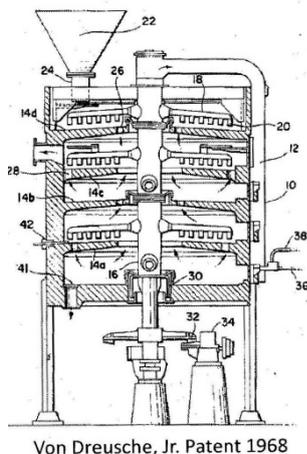
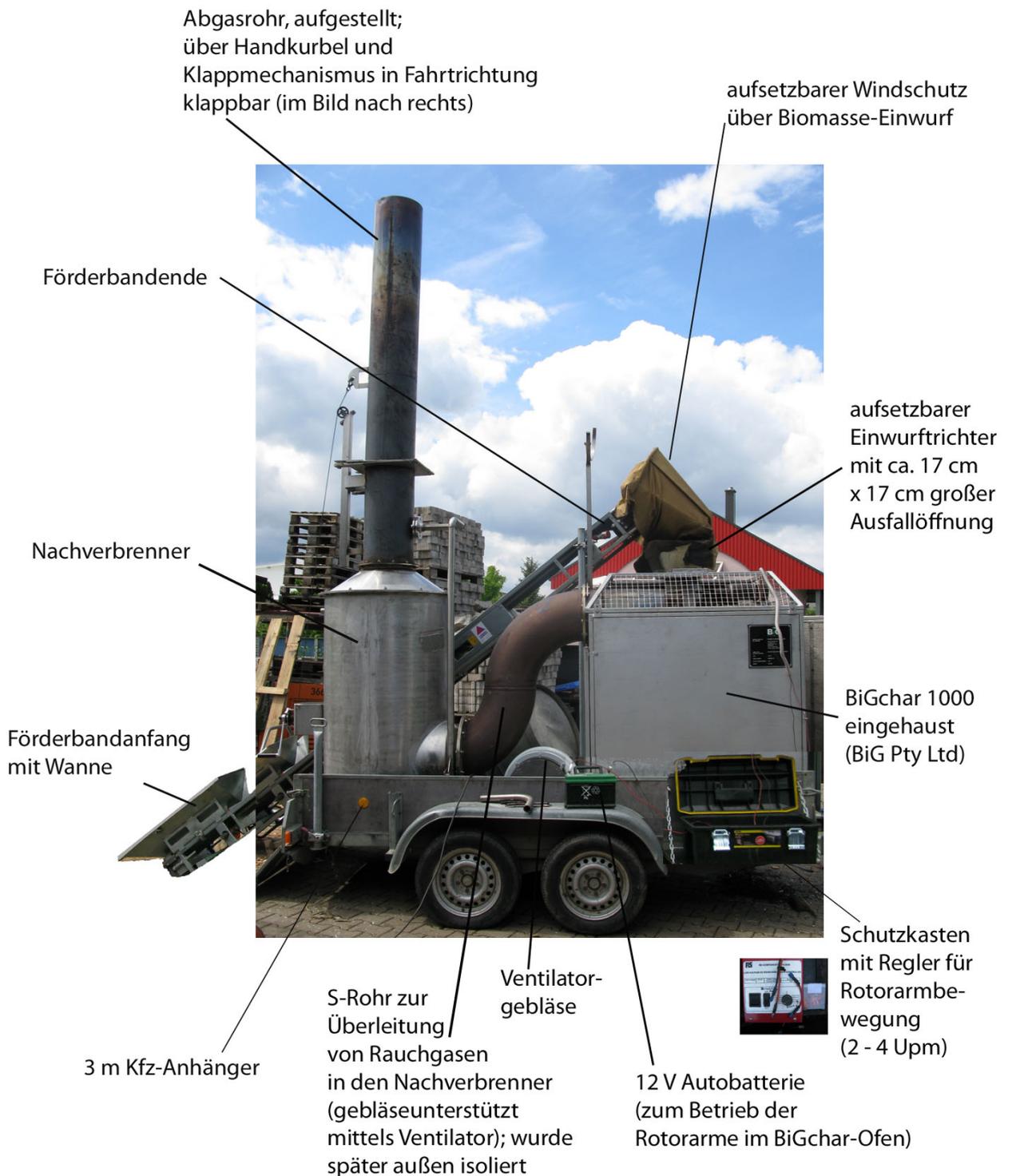


Abb. 1 Im Projekt Carbo-Mob wurde ein Verkohlungssofen (BiGchar1000) des australischen Herstellers BiG Pty Ltd. verwendet. Vorbild waren Rotoröfen, deren Prinzip schon länger bekannt ist (s. Beispiel in Zeichnung li)

Im Ofen herrschen Temperaturen von 400 bis 600° C. Die Dimensionen des Modellofens bestimmen die Verarbeitungsgeschwindigkeit des Schnittguts. Das Mini-Modell hat durch die Auslegung und kontinuierliche Arbeitsweise trotz geringer Eigenstandfläche (0,78 m<sup>2</sup>) einen hohen Durchsatz (ca. 80 – 120 kg/h TM). Eine weitere Besonderheit ist die große innere Oberfläche (Fächerung, Etagenaufbau).

Die ständige, aber langsame Bewegung der Partikel erleichtert den Gasaustausch zwischen Schnittgut-Partikeln und der umgebenden Luft im Brennraum. Der Aufbau begünstigt auch Bedingungen für Verweilzeiten und erstes Abbrennen der Gase. Die Betriebsart des Ofens hat daher nichts mit *Verschmelzungs-Pyrolyse-Anlagen* gemein. Sie hat eher Charakterzüge eines *offenen „Lagerfeuers“*, aus dem jedoch austretende Gase durch den herrschenden Luftzug schnell abgeleitet und weitgehend kontrolliert werden können (weiter Funktionsbeschreibung s. Kap. 5.3).

**Funktionsbild FB\_A: Hauptsächliche Funktionen und Komponenten des Carbo-Mob, Seitenansicht rechts**



*Hinweis: die Momentaufnahme zeigt einige Komponenten im noch unfertigen Zustand*

### 3.3. Thermische Nachverbrennung

Im Hinblick auf die Luftreinhaltung ist die Abgasfrage eine sehr wichtige. Bei der Verbrennung von Biomasse entweichen verschiedene Verbindungen (z.B. Kohlenwasserstoffe, Stickoxide, Feinstaub), die klimawirksam sind oder, wie bei Kohlenmonoxid, bei hohen Konzentrationen den Menschen direkt schädigen können. Um vor allem eine Nachreinigung von noch nicht verbrannten Kohlenwasserstoffen und Kohlenmonoxid zu erzielen, werden bei Verbrennungsöfen oft thermische Nachbrennkammern eingerichtet (engl. oft als *oxidiser* bezeichnet). Hierbei werden allgemein die Abgase eines Verbrennungsvorgangs (d.h. aus einem Ofen bzw. Brennkammer) in eine zweite Brennkammer geleitet, die als Gassammelraum fungiert. Das Prinzip ist, die Prozessgase für kurze Zeit (unter 2 sec) im Brennvorgang zu halten, sodass sie sich weiter zersetzen und bis zum Austritt der Abluft aus dem Kamin auf eine Mindermenge reduziert werden. Durch die momentane Verdichtung des Prozessgases steigt die Temperatur im Nachverbrenner deutlich über die Ofentemperatur.

#### Funktionsbild FB\_B, Seitenansicht links

Sicherungsring um abgeklapptes Abgasrohr während der Fahrt



Für den Carbo-Mob wurde das Brennkammergehäuse des Nachverbrenners mit keramischer Innenwand ausgekleidet, um Wärmeverluste zu vermeiden und so den Temperatureffekt zu erhalten. Die Brennkammertemperatur betrug meist zwischen 800 – 850°C. Direkt über der Nachbrennkammer wurde das 3 m lange Abgasrohr (Kamin) angeordnet, um die restliche heiße Abluft weit außer Reichweite zu befördern. Auch der Kamin stellt einen Raum dar, in dem gasförmige Verbindungen weiter verbrennen. Für die mobile Betriebsweise wurde mit einer Kippvorrichtung und Handkurbel ausgestattet (**FB\_B**).

Da der Unterdruck für einen natürlichen Schornsteinzug bei dieser Anordnung (S-Rohr, Brennkammer, Kamin) nicht ausreichte, wurde ein Gebläse zur Unterstützung des Luftabgangs in den Kamin angebracht (s. Ventilator-Gebläse, **FB\_A**). Mit Hilfe des Ventilators wurden die heißen Abgase aus dem Verkohlungsofen über eine Venturi-Eindüsung in den Nachverbrenner gelenkt. Ein zweiter Ventilator wurde für die Vortrocknungseinheit benötigt. Er sorgte für das Ansaugen heißer Luft am oberen Ende des Kamins (noch nicht sichtbar in **FB\_A**), die über eine Verdünnungsluftregelklappe so mit Kaltluft gemischt werden konnte, dass am Ende des Wärmeschlauchs eine Temperatur von ca. 100 - 150° C für die Vortrocknung zur Verfügung stand.

Zur Regelung von Brennkammer- und Vortrocknungstemperatur wurde ein Schaltschrank eingerichtet, der mit Temperaturfühlern verbunden ist und beide Systeme über eine Frischluftregelklappe steuert. Für Überlastungsfälle wurde eine Störabschaltung eingebaut.

Die Besonderheit des Nachverbrenners beim Carbo-Mob liegt in seiner Unabhängigkeit von zusätzlicher Beheizung (Stützenergie). Während die meisten Nachverbrenner von einem eigenen Brenner versorgt werden (Primärenergie, z.B. Propangas), um eine gleichmäßig hohe Temperatur zur Gasverbrennung zu gewährleisten, sollte beim Carbo-Mob die nötige Energie aus ökologisch-ökonomischen Gründen ausschließlich aus dem ofenseitig entstandenen Prozessgas, das heißt **allein aus der zugeführten Biomasse** resultieren.

### 3.4. Maßnahmen, um geringes Gewicht und leichte Handhabung zu erhalten

Eine Vor-Ort-Verkohlung verlangt generell einen schnellen Aufbau vor jeder Inbetriebnahme. Im bestmöglichen Fall sollte die Anlage eine Person betreiben können. Dem gegenüber steht, dass viele Teile der Anlage aus **Metall** gefertigt sein müssen, um den hohen Temperaturen standzuhalten, d.h. Stahl mit den Nachteilen hohen Gewichts und hoher Preise. Aus ergonomischen, fahrtechnischen und Kostengründen heraus wurde daher nach Ausweichmöglichkeiten gesucht.

In einigen Fällen gelang es, Gewicht zu sparen durch die Verwendung von Leichtmetallen, Rundrohren oder den Verzicht auf Metall durch Alternativen (s. Windschutz und Vortrocknung). Für den Ofenstahl selbst galt die Devise des Herstellers, eine Norm zu wählen, die dickwandig genug ist, um den Beanspruchungen der Hitzeausdehnung stand zu halten und die dennoch das Gesamtgewicht gering hält. Der Ofen darf außer der Einhausung zum Hitzeschutz auch aus anderen Gründen nicht zu sehr isoliert werden. Zum einen um das Aufweichen des Materials durch die hohen Temperaturen zu vermeiden, zum anderen aus sicherheitstechnischen Gründen (s. 3.7.).

Der Aufbau von Betriebsteilen wie etwa Förderbandtrichter oder Gestängen, die nur im Betrieb am Einsatzort benötigt werden, bedeutet zwar jeweils nur kleine Handgriffe, wird aber in der Summe vor allem dann zeitraubend, wenn spezielles Werkzeug nötig ist. Erleichterungen brachten Schnellstecksysteme, Klettverschlüsse, der Ersatz von Kopf- mit Flügelschrauben, Wände aus Planen

statt Blechen (s. Vortrocknungsbehälter). Für den Transport war es wichtig, die benötigten Teile sicher und zudem so platzsparend wie möglich auf dem Anhänger unterzubringen, dass nur wenige Einzelteile (Kohleaustrag, Leiter, Biomassebehälter, Generator Hubwagen) im Zugfahrzeug mitgeführt werden mussten.

**Windschutz am Biomasse-Einwurf:** bei Windstärken über 6 m pro sec ist die Verkohlung auf freier Fläche kaum möglich, da die Luftführung des Ofens zu sehr gestört wird. Mit dem Experiment eines aufsetzbaren Metallgestänges mit feuerfester Stoffbespannung konnten sowohl Windabwehr, als auch die Forderung einer leichten Anbringung erfüllt werden (s. Funktionsbild A). Von einer Vollummantelung, die gegen einfallende Kaltluft abdichtet, sah man jedoch ab, um schwere Zusatz-aufbauten und damit erhöhten Fahrtwiderstand zu vermeiden. Der Lufteintrag, der durch den Windschutz zwar etwas eingeschränkt, aber immer noch offen war, wirkte sich auf den Gesamtprozess der Verkohlung jedoch keineswegs störend aus.

### 3.5. Schnittgut-Vortrocknung - *ein Spagat von Temperatur, Zeit und Raum*

Die ursprüngliche Planung für ein **Vortrocknungssystem** war eine Schneckenförderung mit Heißluftkanal in einem abgeschlossenen Rohr. Bei der Berechnung der notwendigen Dimension stellte sich jedoch heraus, dass das lange Rohr sowohl den vorhandenen Platz als auch das mögliche Gewicht überschritten hätte. Für die Vortrocknung der Biomasse wurde aber eine gute Lösung gefunden in Form von leichten, luftdurchlässigen Sammelbehältern mit höchstens 200 – 250 l Einfüllvolumen. Diese konnten fließend von einer zur anderen Position gebracht werden (**FB\_C**).

Die **ungehinderte Fortbewegung** des Materials schien besonders wichtig, da für viele **Fördersysteme** von Schnittgut bald klar wurde, dass die vorliegende Heterogenität (teilweise lange Fragmente mit faseriger Beschaffenheit) Probleme bereiten würde. Im Projekt selbst war bei einigen Gelegenheiten gut sichtbar, dass das Schnittgut umso leichter zu transportieren war, je **weniger Engstellen** vorhanden waren und je **offenliegender** das Material befördert werden konnte. Auch aus diesem Grund schien eine Schneckenförderung ungeeignet, da bei den anvisierten Schnittguttypen häufiges Öffnen und Säubern des Förderraums prognostizierbar waren. Auch am Biomasseeinwurf kam die Idee einer Zellenradschleuse, wurde aber verworfen, um Engstellen zu vermeiden. So transportierte das gewählte Förderband (**FB\_C rechts**) verschiedenste Schnittgut-Partikel in locker aufliegender Weise störungsfrei.

Problematisch war jedoch die schiefe Ebene des **Förderbands** mit einem Winkel von knapp über 45°. Partikel, die leichter waren als Holzschnitzel oder viele runde Oberflächen hatten (z.B. Schilf), neigten daher zum Zurückrutschen. Für einen Langzeitbetrieb wären daher tiefere Laufband-Taschen empfehlenswert. Auch eine größere Entfernung zum Biomasse-Einwurf oder hitzebeständigeres Bandmaterial würde helfen, um das Förderband gegen gelegentlich zu hohe Hitzestrahlung aus der oberen Etage zu schützen.

**Vorbedingungen und Ablauf der Vortrocknung.** Um gute Ergebnisse in Kohleeffizienz und Emissionswerten zu erhalten, sollte das Schnittgut ein Trockensubstanzgehalt von mindestens 75 % besitzen. Aus diesem Grund wurde nach Möglichkeiten gesucht, mit Hilfe heißer Abluft aus dem Anlagenbetrieb Schnittgut in möglichst kontinuierlicher Art und Weise vorzutrocknen. Hierfür musste ein Spagat zwischen Abwärmtemperatur, Zeitbedarf und Schnittgutvolumen (20 bis 30 min pro 200 l Schnittgutcharge) sowie einer möglichst flächigen Ausbreitung und Luftdurchlässigkeit des

Schnittguts vollzogen werden. Die Frage war, wie Warmluft (< 150° C) so auf das Schnittgut geführt werden kann, dass sie eine möglichst hohe Oberfläche erfasst und leicht gebundenes Wasser in Form von Wasserdampf in kurzer Zeit wegführt.

### Funktionsbild FB\_C: Wechselbehältersystem zur Schnittgutvortrocknung



Heißluft wird hierzu mit Hilfe eines Ventilators aus dem oberen Bereich des Abgasrohrs abgeleitet und über einen Regler mit Umgebungsluft auf die passende Temperatur abgemischt. Die Warmluft wird in einen Trockensack gelenkt, der sich unter dem Biomasse-Behälter befindet und die Luft zwangsläufig nach oben lenkt. Die besonderen Vorteile des Sacks lagen darin, leicht zusammenzufalten, genügend robust und temperaturstabil zu sein. Nach einer Trocknungsphase von ca. 20 – 30 min (entsprechend der Zeit einer Behälterleerung über dem Förderband) wird der Sammelbehälter von der *Trocknungsstation* über Metallschienen in Richtung *Entladestation* über das Förderband geschoben (**FB\_C Mitte**). Durch eine Schließgestänge wird der Boden aufgeklappt und das Schnittgut auf den Förderbandtrichter entleert (**FB\_C rechts**). Auch hier ersetzen Planen die schweren und unförmigen Blechwände. Ist der Inhalt weitgehend vom laufenden Förderband abgeführt, kann der Behälter weggenommen und wieder befüllt werden.

Ein immer wiederkehrendes Thema war die kontinuierliche, selbstlaufende Nachlieferung aus der Förderbandwanne. Oftmals musste bei Brückenbildungen oder schlechtem Materialtransport per Hand nachgeholfen werden. Spürbare Verbesserungen ergaben möglichst steil aufklappende Auslasswände am Sammelbehälter. Eine weitere Optimierung waren verstellbare Gleitlaschen am Boden der Förderbandwanne, sodass Anpassungen an das Schnittgut möglich waren. Die Anlage mit

einer Person zu betreiben, würde bei anhaltendem Nachlieferproblem vermutlich einen automatischen Rüttler nötig machen, was weitere Automatisierung und erhöhtes Gewicht bedeuten würde.

### 3.6. Übergangslösung für den Kohleaustrag: Metalltröge

Da noch keine Förderschnecke am Kohleaustrag finanzierbar war, bestand die Übergangslösung in Auffangtrögen aus Stahlblech. Auch hier bot sich ein System mit Wechselbehältern an (**FB\_D**). **Metallbehälter mit Lochblecheinsätzen** und ca. 50 l Fassungsvermögen wurden halb mit Wasser gefüllt und zum Auffangen und gleichzeitigen Ablöschen der Kohle unter die Austragsöffnung des BiGchar-Ofens geschoben. Ein Führungsgestänge half Bodenunebenheiten oder leichtem Schiefstand der Anlage auszugleichen. Ein möglichst guter Dichtschluss zwischen Trog und Ofenaustrag war wichtig, um Rauchentwicklung, Veraschung durch Luftzutritt oder auch Brandgefahren zu vermeiden. Mithilfe einer Stange wurde der wachsende Kohlehaufen im vorderen Teil des Trogs von Zeit zu Zeit aufgelöst und nach hinten geschoben. Volle Tröge wurden herausgezogen und leere eingewechselt. Danach war auf vollständiges Ablöschen der Kohle im vollen Kohletrog zu achten. Nach Herausnahme der Lochblecheinsätze konnte überschüssiges Wasser leicht ablaufen und die Kohle an der Luft trocknen. Nachteile waren einseitiges Verziehen des Metalldeckels durch die Hitzeeinwirkung sowie das hohe Gewicht, was das Einwechseln und die Handhabe für eine Einzelperson nicht leicht machte. Eine Austragschnecke würde die Arbeitsbelastung reduzieren.

#### Funktionsbild FB\_D: Wechselbehälter als Lösch- und Auffangtröge für glühenden Kohleaustrag



### 3.7. Sicherheitsvorkehrungen

**Hitzeschutz:** die bei Betrieb heiß werdenden Metalloberflächen von Ofen oder Rohren wurden so ummantelt, eingehaust oder abgeschirmt, dass keine Hitzegefahr für den Betreiber ausging. Beim Öffnen der Türen besteht wenig Gefahr, da sich durch die *nicht-abgeschlossene Bauart* des Ofens (kein dichter Luftabschluss im Gegensatz zu typischen Pyrolyseöfen) keine Gasblasen bilden, die blitzartig austreten könnten. Insofern ist gerade die offene Ofenbauweise ein wichtiger Sicherheitsaspekt. Der zu vermutende Nachteil von Energieverlusten scheint dennoch nicht übermäßig zu Buche zu schlagen, da sich die Kohleeffizienz fortwährend auf einem hohen Niveau bewegte.

**Brandschutz:** Wichtig ist genügend Löschwasser am Einsatzort. Ist keine Wasserschöpfmöglichkeit vorhanden, muss dieses in Kanistern mitgeführt werden (ca. 150 l pro Tag). Am Einsatzort selbst muss auf genügenden Abstand zu Baumbestand oder leicht entflammbarem Material genommen werden, da vereinzelter Funkenflug aus dem Kamin nicht zu vermeiden ist.

**Atemschutz:** schon beim Umgang mit Hackschnitzeln sollte ein Atemschutz getragen werden, um das Einatmen von Staubpartikeln zu vermeiden. Eine Atemmaske ist ebenfalls von Vorteil beim Anzündvorgang oder bei Kontrollsichtung des Ofenbetriebs (**FB\_E links**), um direktes Einatmen von Brandgasen und Feinpartikeln zu vermeiden.

Emissionsschutz und Inhaltstoffe Pflanzkohlen siehe Kap. 5.

#### Funktionsbild FB\_E: Exemplarische Sicherheitsvorkehrungen (FB\_E)



Hitzeschutzwände um den BiGchar-Ofen

Atemmaske gegen Staub und Rauch

Lichtanzeige am Förderbandende während der Fahrt

### 3.8. Tauglichkeit im Straßenverkehr

Um den BiGchar 1000-Ofen straßen- und geländegängig zu machen, wurde er auf einen **nur 3 m langen und 1,4 m breiten Kfz-Anhänger** montiert. Das Gesamtgewicht durfte **3,5 t** nicht überschreiten. Das um über ein Meter überstehende Förderband machte die Anbringung einer zusätzlichen Blink- und Bremslichtregelung erforderlich (**FB\_E rechts**). Das auf eine Gesamthöhe von 5 m hochragende Abgasrohr wurde mit einem Klappmechanismus per Handkurbel versehen, sodass die straßenzulässige **Gesamthöhe** eingehalten wurde. Alle Anhängeraufbauten und Zusatzteile wurden so angebracht, dass sie auch bei Transportgeschwindigkeiten von 80 km/h gesichert blieben. Kleinteile, die sich im Lauf der Zeit lockern könnten, wurden mit Sicherungsketten

versehen. Eine TÜV-Abnahme bestätigte die Tauglichkeit des so aufgebauten Anhängers im Straßenverkehr.



*Carbo-Mob, Zustand Herbst 2013 (Fahrt zum Energietag Baden-Württemberg)*

### **3.9. Einsatzbereitschaft der Carbo-Mob-Anlage**

Neben der Mobilität sind die Umstände von Auf- und Abbau der Carbo-Mob Anlage entscheidend. Bei Neuankunft an einem Standort benötigt der Aufbau ca. 1 Stunde. Zum Anzünden des Ofens werden ausschließlich Papier, Pappe und trockene Holzspäne bzw. Schnitzel benötigt. Bis zum geregelten Ofenbetrieb vergehen etwa 15 – 30 min. Die Abkühlzeit beträgt 30 min. Bei einer Verkohlung im Winter wird etwas mehr Zeit für die Anheizphase benötigt. Auch höhere Trockengehalte im Schnittgut wären hier vorteilhaft. Für die Praxis ist ein Zuggefährt (mit Vierradantrieb) zu empfehlen, das speziell für die Zwecke des Carbo-Mobs eingerichtet ist und eine zügige Bereitstellung der Zusatzgeräte ermöglicht (Generator mit 230 V, Leiter, Förderbandtrichter und Windschutz, Sammelbehälter und Gestänge, wenn nicht auf dem Anhänger selbst montierbar). Der Anlagenbetrieb ist zum derzeitigen Zeitpunkt noch von vielen Handgriffen geprägt. Durch weiteres Ausreifen des Zusammenspiels aller Einzelkomponenten ist ein zufriedenstellender Zustand jedoch absehbar.

## **4. Erfahrungen mit Schnittgut aus unterschiedlichen Standorten**

### **4.1. Flexibilität des Etagenofens bei unterschiedlichem Häckselgut**

Das Schnittgut lag in unterschiedlichster Partikelverteilung vor (Bildtafel 2; Tabelle 1). Bei hohem Trockengrad (> 80 % Trockensubstanzgehalt) wies die Verkohlung im Hinblick auf Ausbeute und Vollständigkeit eine sehr gute Effizienz auf (ca. 30 Gew. % Kohle aus 100 % Ausgangsbiomasse). Die jeweils besten Ausbeuten ergab sich für die Hackschnitzel-Größenordnung und –Feuchte wie sie bei Obststockrodung vorlag. Bei feuchterem oder gröberem Material ging die Ausbeute auf 25 % zurück. Bei Weinstöcken blieb die Ausbeute trotz höherer Stückigkeit, Feuchte und Erdanhaftung jedoch hoch (knapp 30 %), vermutlich aufgrund des sehr dichten Holzes. Als allgemeines Fazit zeigte sich, dass gröbere Holzstücke (10–15 cm) für die BiGchar-Verkohlung keine Probleme verursachten.

Auch noch längere Triebabschnitte, wie sie bei Weichholzaufwuchs aus einer Naturschutz-Pflegefläche aufgrund abgewetzter Hackermesser gelegentlich vorlagen, stellten für den Ofen keine Probleme dar, da dünn und biegsam. Schwierigkeiten traten hier allerdings beim aktuell verwendeten Vorratsbehälter auf, wenn sich die Triebe querlegten und so die Nachlieferung auf das Förderband behinderten.

**Tab. 1 Schnittgutbeispiele und Partikelverteilung**

Größenklasse	Gewichtsanteile in jeweiliger Größenklasse in %								TS-Gehalt %
	<u>20 - 25</u>	<u>15 - 20</u>	<u>10 - 15</u>	<u>6 - 10</u>	<u>5 - 6</u>	<u>3 - 5</u>	<u>1 - 3</u>	<u>&lt; 1</u>	
	[ cm ]								
Waldernte (Reste)					9,5	35,3	40,8	14,4	85 – 88
Obststockrodung				2,5	17	29,9	33,8	16,8	80 – 82
Weichholz aus Naturschutz		5	5,2	9,8		28	29,5	22,4	71 – 75
Rebstockrodung	15,0*	12,7**	66,4**	4,2		0,6	0,6	0,5	70 – 72

Anmerkung: nach EN 14961-1 könnten die meisten Beispiele rein größenmäßig als P45 klassifiziert werden (< G30) mit Weinstock als Ausnahme mit P100 (größenmäßig G50 nach OENORM M7133).

\* Weinstockrodungsstücke der Größenklasse 20 - 25 cm wurden aussortiert

\*\*die Verkohlung langer Weinstockhäcksel funktionierte auch bei über 5 cm Dicke

Grund für die **Toleranz gegenüber der großen Spannweite von Stückgrößen** ist zum einen der innere Aufbau des BiGchar-Ofens: die Böden der insgesamt fünf Etagen besitzen Perforierungen, sodass je kleiner die Stücke sind, umso schneller ins nächstuntere Fach fallen. Zusätzlich kann durch Herausnahme von Bodensegmenten die Durchflussgeschwindigkeit erhöht werden. Dies kann bei größeren Stücken (z.B. Weinstockhäcksel) zum Teil unterbleiben, sodass sie länger auf einer Etage rotieren. Durch Hitzeeinwirkung und Oberflächenabrieb zerbrechen die Stücke in nächstkleinere Teile, um endlich als Kohlestücke ausgetragen zu werden. Für eine vollständige Verkohlung muss der Durchtransport langsam genug sein aber dennoch so schnell, dass die Partikel einer fortgesetzten Oxidation rechtzeitig entzogen werden.

**Kontinuierliche Schnittgutförderung im Ofen.** Pro Etage gehen von der Rotorachse zwei sich gegenüberliegende horizontale Stangen aus, die als Rotorarme fungieren und etagenweise um einige Grade versetzt sind. Die Rotorarme bewegen die Schnittgutpartikel mit Hilfe von Schleppgewichten über perforierte Böden (Roste). In Anpassung an die Kleinteiligkeit des Materials kann die Drehgeschwindigkeit der Rotorachse verändert werden. Der Motor mit langsamer Maximal-Drehzahl (5 Upm) ist beispielsweise bei grobem Schnittgut oder höherem Feuchtegehalt bis auf halbmaximale Geschwindigkeit herunterregulierbar, verliert jedoch dabei an Zugstärke.

Trotz dieses Standardisierungsprozesses weichen die **Kohleresultate in Form oder Größenverteilung der Partikel** voneinander ab (Bildtafel 2). Gründe sind verschiedene Energiegehalte und Brennverhalten (mit Abhängigkeiten von Dichte, Feuchte, Inhaltstoffe usw.) sowie unterschiedliches Bruch- und Oberflächenverhalten des Materials. Weinstöcke beispielsweise mit hoher Holzdichte und gleichzeitig gedrungenem Wuchs ergeben im Ofenabrieb rundliche Kohlestücke. Bei Wald- und Obsthackschnitzel aus Holz mit vorwiegend langgestrecktem Wuchs war das Resultat eher scherbenhaft und am regelmäßigsten von allen getesteten Materialien. Im Gegensatz dazu erhält man bei regelmäßigen Zweigen wie im Schnittgutsortiment *Naturschutzpflege* eher längliche

Stücke, oft in ursprünglicher Astrundung. Ähnlich verhält es sich mit den gleichmäßig gewachsenen Stängeln von starkem Halmgut wie Schilf. Um solches Material vor zu schnellem Abbrand zu schützen, muss die Rotorbewegung für einen schnelleren Austrag beschleunigt werden. Eine andere Möglichkeit ist das Einhängen zusätzlicher Schlepper am Rotorarm, was jedoch vor Betriebsstart erfolgen muss.

Bei Weinstockrodungsholz traten Verschmutzungen wie **Sand, Steine und Eisenteile** (bis 12 cm) auf (Bildtafel 3-1). Dass der Verkohlungssofen und die gewählte Schnittgut-Förderung damit jedoch keine Schwierigkeiten hatten, beweist die hohe Toleranz und Robustheit der Technik. Die Tatsache, auf Säuberungsmaßnahmen verzichten zu können, kann fallweise ein großes Plus bedeuten.

**Schwächeres Halmgut wie zum Beispiel Heu aus Gras** konnte im vorhandenen Aufbau nicht erfolgreich verkohlt werden. Die geringe Dichte und damit fehlendes Gewicht verursachten einen zu langsamen Fall durch den Biomasse-Trichter, sodass Heu schon im obersten Fach verbrannte. Ein anderer Aufbau des Etagenofens könnte hier Abhilfe schaffen. Daneben wäre auch eine spezielle Vorbehandlung des Heus zu lockeren Minibündeln mit Kantenlängen von ca. 8 cm denkbar (Bildtafel 4-2 rechts). Gepresste käufliche Heupellets mit 8 cm Durchmesser (Bildtafel 4-2 links) zeigten aufgrund der zu hohen Dichte keinen Erfolg und kamen nur halb verkohlt aus dem Ofen heraus.

In einigen Fällen wies die erhaltene Pflanzenkohle **unverkohlte Kerne** auf, was auf Ungeübtheiten in der Einschätzung von Material oder in der Anpassung des Ofenarrangements zurückging. Insbesondere der Wassergehalt ist ein wichtiger Faktor. Während die Schnittgutfeuchte laufend im Projekt bestimmt wurde, wäre dies bei Normalbetrieb eines Carbo-Mobs kaum möglich. Um den Prozess zügig auf Idealbedingungen einzustellen, bedarf es daher einer guten **Einschätzung** der Materialeigenschaften und einer intensiven Sichtkontrolle des Verkohlungsergebnisses. Es wurde klar, dass einige **Erfahrung** des jeweiligen Betreibers nötig ist, wenn die Verkohlungsanlage in der Praxis Anwendung finden soll.

Die Betrachtung der Schnittgutsortimente zog Überlegungen für geeignete **Zerkleinerungssysteme** nach sich. Größere Hacker (an Schleppern), die man bei der Obststockrodung und bei Waldrestholz verwendet, wären bei entsprechender Materialmenge geeignet. Für kleinere Erntemengen jedoch zu teuer pro Zeiteinheit. Liegen dünnere Aststärken vor, könnten Zerkleinerungsgeräte auch selbst mitgeführt werden. Die Tatsache, dass die Verkohlungsanlage auch grobes Material verarbeitet, könnte zu Ersparnissen für den **Zerkleinerungsaufwand** führen. Im Sortiment Strauchgut gab es jedoch vorwiegend Geräteangebote, die sehr klein häckselten. Dies mag mit dem Anwenderrahmen und Verwendungsziel zusammenhängen (Gartenbesitzer; Kompost, Einstreu). Der einzige Treffer mit **Stücklängen von ca. 8 bis 10 cm** fand sich auf einer polnischen Website (Ref. 6). Hier basierte die Zerkleinerung auf schnellen Trennschnitten quer zur Astrichtung, dies bei zügigem Durchschub des Materials. Ob dies mit einer Einsparung in der Motorleistung einhergeht, die sich positiv auf die Gesamtenergiebilanz auswirken, kann noch nicht beantwortet werden.

Bei Rebkulturen bestand als neues Gerät für die Stockrodung ein **umgebauter Olivenhäcksler**. Auch wenn das inhomogene Häckselergebnis keine Schwierigkeit für die Verkohlungsanlage darstellte, stand bei näherer Betrachtung jedoch die Engräumigkeit vieler Weinberggegenden einer Vor-Ort-Verkohlung entgegen. Ein Wassergehalt von über 40 % (wie bei frisch gerodetem Material) würde die Vortrocknung auf dem Feld nötig machen. Dagegen steht, dass das Rodungsholz zügig entfernt werden muss und auch kaum Platz an Feldrändern gegeben wäre. Die Frage muss für unterschiedliche Weingegenden eventuell gesondert betrachtet werden.

## 4.2. Anpassungsmöglichkeiten der Schnittgutfeuchte

Die klimatischen Bedingungen in hiesigen Breiten stellten sich als besondere Hürde für die Verwirklichung einer Vor-Ort-Verkohlung heraus. Wird ein Wassergehalt von 25 % beim Verkohlungs-gut überschritten, besteht höhere Gefahr für schlechte Emissionswerte und nicht verkohlte Anteile.

Um den Trockengrad des Schnittguts in einen passablen Bereich zu lenken, wurden verschiedene Maßnahmen überlegt und zum Teil schon angegangen:

- Die Errichtung einer **Vortrocknungsmöglichkeit (s. FB\_C)** unter Nutzung von Abwärme aus dem eigenen Prozess; erste Versuche mit dem Wechselbehältersystem zeigten eine Verdunstung von Wasser um 2 – 4 % bei Schnittgut mit ca. 70 % TS-Gehalt binnen einer Trocknungsphase von 30 min bei 100 – 110° C warmer Abluft; um genügend Wärmeenergie für den ersten Wechselbehälter zu produzieren, müssen jedoch trockene Häcksel (ca. 85 % TS) mitgeführt werden; in der Trocknungsleistung sind deutliche Verbesserungen zu erwarten, wenn am Ende des Wärmeschlauchs Temperaturen von 150° C herrschen (derzeit im Test).
- **Trockengestelle** zur luftigen Lagerung von Schnittgut vor Ort. Mit Ansprechpartnern aus dem Naturschutz (LNV e.V. und NABU Freiburg, Ref. 7) wurden für Pflegeschnitte im Nov/Dez 2013 Trockengestelle aus Holzlatten für Weiden-, Pappel- und Erlenruten gefertigt, um einen besseren Luftdurchgang zu ermöglichen. Nach vier Monaten wiesen so die aufgestellten Rutenbündel gegenüber gewöhnlich geschichteten (Bildtafel 3-2 rechts) erstaunlicherweise bis zu 11 % höhere Trockengehalte auf. Im Versuch war die Verkohlung daher schon am Tag nach dem Häckseln möglich. Dass der mittlere Trockengehalt dann schon 76 % erreichte, lag allerdings auch an der diesjährig trockenen Witterung (im Vergleich zur letztjährigen Feuchteperiode).
- Daneben besteht die Möglichkeit, mit **Hackschnitzelvliesen** zu arbeiten (Bildtafel 3-1 Mitte), die heute in immer besseren technischen Eigenschaften angeboten werden; wichtig ist ein steiler Abfall der Vlieswände über dem Trockengut, sodass Niederschlag durch das Gewebe aufgehalten und entlang der Vlieswände abgeleitet wird, während evaporierendes Wasser aus dem Trockengut frei durch den Stoff hindurch verdunstet; die Vliese können für Grobschnitt ganzer Äste wie auch Häcksel verwendet werden. Voraussetzungen sind genügend Platz zur Lagerung und ein Feuchteschutz am Boden.

## 5. Umweltverträglichkeit von Produktionsprozess und Kohleprodukten

### 5.1. Allgemeine verbrennungstechnische Merkmale für Holz und Schnittgut

In der Abluft aus der Verbrennung von Holz zur Warmegewinnung finden sich hauptsächlich folgende Verbindungen: Wasserdampf, Stickstoff  $N_2$ , Kohlendioxid  $CO_2$ , Kohlenmonoxid  $CO$ , Stickoxid  $NO_x$ , verschiedene Kohlenwasserstoffe sowie andere flüchtige Stoffe und Feinstaub (PM = particle matter). Wird 1 kg Holz vollständig abgebrannt, ist von einem verbrauchten Luftvolumen von ca.  $10 \text{ m}^3$  auszugehen. Um den grundsätzlichen Verlauf der Abgasbildung während der Verbrennung mit Anheiz-, Haupt- und Abkühlphase zu zeigen, ist ein Diagramm aus Ref. 8 abgebildet (Abb. 2). Der betreffende Ofen wurde ein zweites Mal nach 1 h 20 min bestückt und hat, typischerweise für solche Feuerstätten und im Unterschied zu Carbo-Mob, kein Gebläse zur Verbrennungsluftförderung. Bei unvollständiger Oxidation bei ungenügender Sauerstoffversorgung (wie es bei Anlauf- und Abkühlphasen vorkommt) entstehen unerwünschte Verbindungen wie  $CO$ , Kohlenwasserstoffe (Teer,  $C_nH_n$ ) und Ruß (Schwarzpigmente).

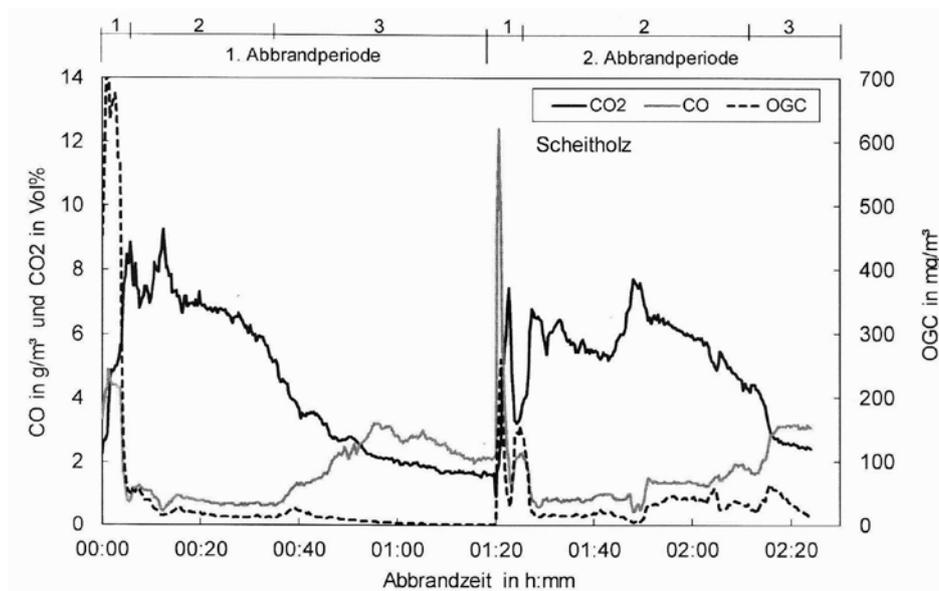


Abb. 2. Das Diagramm (entnommen aus Ref. 8) zeigt den Verlauf der CO<sub>2</sub>-, CO- und OGC-Konzentrationen (organische gebundene Kohlenwasserstoffe) beim Abbrand von Buchenscheitholz in einem Kaminofen.

Deutlich höhere CO-Werte gibt es zum Beispiel während der Anheiz- und Abglimmphase. Der Kurvenverlauf ist auch abhängig von der Auslegung des Kamins und der Funktionsweise und angepassten Dimension des Schornsteins. Bei anderen, größeren Anlagen kann mit Hilfe eines Gebläses (Ventilator) der Luftabzug so gesteuert werden, dass sich die Verhältnisse für den Gasaustausch verbessern und Spitzenwerte flacher verlaufen. Dies wurde für Carbo-Mob umgesetzt.

Nicht brennbare Feststoffe bleiben als **Asche** zurück. Hier finden sich auch Mineralstoffe wie Kalium, Kalzium und Magnesium. Reines Holz hat einen sehr niedrigen Aschegehalt (etwa 0,5 % der Trockenmasse). Höhere Aschegehalte können bedingt sein durch Rindenanteile von zwei bis fünf Prozent und durch Verunreinigungen wie Erden (Tab. 4, Ref. 9). Bei BiGchar-Öfen wird die Asche zusammen mit Kohlepartikeln ausgeschleust. Für Bodenzwecke ist die Düngerwirkung der Asche eine positive Begleiterscheinung, aber nur kurzfristig zu betrachten und nicht das entscheidende Merkmal der Nachahmungs-idee bei *Terra preta*, wo es um nachhaltige Effekte der Kohle aufgrund ihrer physikalischen und Oberflächen-Eigenschaften geht.

## 5.2. Faktoren der Ausgangsbiomasse, die die Abgassituation verschlechtern

Die vollständige Verbrennung mit niedrigen Rauchgaswerten wird oft gestört durch ungenügende Materialeigenschaften. So ist der Feuchtegehalt emissionstechnisch von großer Bedeutung. Wie ein Kamintest zeigte (Ref. 10), hat Holz mit 25 bzw. 35 % Holzfeuchte gegenüber Holz mit nur 14 % Feuchte bis zu 3- bzw. 5-fach höhere CO-Werte (Tabelle 2). In absoluten Zahlen kommt der CO-Ausstoß beim viel zu feuchten Holz mit 65 % TS-Gehalt nahe 5 g/m<sup>3</sup> Abgas.

**Tabelle 2: CO-Abgaswerte bei Holz unterschiedlicher Feuchte für zwei Öfen (Quelle: Ref. 10)**

Holzfeuchte	14 %	25 %	35 %
CO in [g/m <sup>3</sup> ]	1,0 – 1,6	2,2 – 3,0	4,1 – 5,0

Höhere Feuchtegehalte haben Bedeutung für die Effizienz der Biomasse-Verbrennung (und ebenso Verkohlung). Um Wasser zu verdampfen, werden zusätzlich Energien abgezogen, sodass in Verbrennungsanlagen wie auch bei der Verkohlung trockeneres Material zu bevorzugen ist. Wie schnell der Heizwert mit zunehmender Feuchte sinkt, beschreibt Tabelle 3. Bei der Verkohlung im System BiGchar machen sich höhere Wassergehalte mit geringerer Kohleausbeute bemerkbar.

**Tabelle 3: Zusammenhang von Wassergehalt, Biomasseart und Heizwert**

<i>Biomasse (je 1 kg)</i>	<i>Wassergehalt in %</i>	<i>Heizwert in kWh/kg</i>	<i>Quellen</i>
Buche/Fichte (lufttrocken)	15	4,2 – 4,3	Ref. 11
Buche/Fichte	30	3,3 – 3,4	Ref. 11
Buche/Fichte	40	2,8	Ref. 12
Halmgut (z.B. Stroh)	15	3,9	Ref. 11
Strauchschnitt	30	2,0 – 2,2	Ref. 11

Abbrennen von vitalen Pflanzen (wie bei natürlichen Vegetationsfeuern der Fall) bedeutet aufgrund des hohen Wassergehalts (frisches Holz 50 %; Grüngut über 90 %) daher grundsätzlich schlechte Verbrennungsbedingungen. Finden Brände in gemäßigten, niederschlagsreicheren Zonen statt, gibt es zusätzlich nachteilige Bedingungen.

Manche Schadstoffgehalte sind auch höher bei hohem Nischtholzanteil aufgrund anderer Stoffzusammensetzung wie etwa bei hohem Rindenanteil oder wenn die Pflanzendecke reich an Halmgut ist. So können schlechtere Bedingungen auch aufgrund höherer Gehalte an Elementen wie N, Cl, und Mineralstoffen bestehen. Stickoxidemissionen (NOx) sind eng mit dem Stickstoffgehalt des eingesetzten Brennstoffs verbunden. Beispiele sind Sträucher und Mahdgut. So kann auch der Stickstoffgehalt bei Halmgut dreimal so hoch wie der von Holz sein. Chlor erhöht das Risiko von Korrosion, Kalium spielt eine Rolle für die Ascheerweichung (spielt bei der vorliegenden Technik keine Rolle). Wie aus Tabelle 4 ersichtlich wird, haben krautige Pflanzen und Halmgut auch einen vielfach höheren Aschegehalt als Holz.

**Tabelle 4: Aschegehalte verschiedener Biomassen (Ref. 11)**

	Fichten und Buchenholz (m. Rinde)	Weichholz Kurzumtrieb	Rinde Nadelholz	Straßengrasschnitt	Sonnenblumenstroh
Aschegehalt in %	0,5 – 0,6	1,8 – 2,0	3,8	23,1	12,2

Auch die Stückgröße und Standardisierung des Brennguts hat Einfluss auf den Verbrennungsverlauf. So ist „Schredderholz“ nicht zu vergleichen mit Qualitätshackschnitzel, die häufig mit Messern geschnitten und daher viel glattrandiger und regelmäßiger sind. Versuche, minderwertigen Waldholz- oder Strauchschnitt in thermischen Anlagen zu verwenden, zeigen die Notwendigkeit verschiedener Anpassungen in der Auslegung des Heizkessels samt Fördertechnik (z.B. extra langer Rost für die Vortrocknung des Materials; wassergekühltes Aggregat zur Vermeidung von Schlackebildung; Vermeidung von Förderschnecken, Ref. 13, 14).

### 5.3. Besondere verbrennungstechnische Merkmale des verwendeten Ofens

Der BiGchar-Ofen hat einen eigentypischen Aufbau, der zum Vermeiden unerwünschter Gase beiträgt. Zu den Besonderheiten zählen die hohe räumliche und flächige Ausdehnung des Innenraums (bei dennoch geringem Standraum) sowie die relativ offene Beschickung mit Schnittgut. Die Offenheit der Ofenauslegung bedeutet bewusste Sauerstoffzufuhr und trägt zur Ausbildung einer speziellen Thermik und eines optimalen Luftzugs bei. In den Vorgängen von Materialbeschickung, Hitzeentwicklung und Luftzufuhr scheint sich ein Gleichgewicht von Unterdruckverhältnissen auszubilden. Diese wird vom Hersteller gelegentlich als „**natural draft**“ bezeichnet (übersetzt etwa „natürliches Luftregime“). Durch den sich im Ofen aufbauenden Luftzug und die ständige Bewegung des Brennguts wird die Verbrennungsluft gut an die Holzpartikel herangeführt und gleichzeitig mit den Pyrolysegasen durchmischt. Gut zu beobachten ist die schnelle Reaktion des Systems auf Veränderungen der Schnittgutverteilung oder Nachlieferung. Bei zufälliger Haufenbildung von Schnittgut im obersten Fach (z.B. bei Förderbandstopps) steigen die CO-Werte fast im Sekundenabstand an und wird Rauch am Kaminende sichtbar.

Das aufgefächerte Ofeninnere bietet den aus der Biomasse austretenden Gasen Raum<sup>2</sup>, sodass vermutlich schon ein Teil der Gase verbrannt und unschädlich gemacht wird, bevor sie in die weiteren „Entsorgungs“-Räume, Nachverbrenner und (eingeschränkt) Kaminrohr, gelangen. Der Ofenaufbau samt Rotation verhindert die Ausbildung von „Schwelbränden“, die mit ungünstigen Abgaswerten einhergehen. Die durchlässige Betriebsart steht daher im Gegensatz zur Auslegung von Pyrolyse-Anlagen wie sie zur Behandlung von Abfall eingesetzt werden bzw. wurden<sup>3</sup>.

Probleme wie Schlackebildung scheiden aus, da im Ofen keine Temperaturen von 900° C erreicht werden. Teerbildung konnte nach ca. 100 h Betriebsdauer nicht beobachtet werden. Laut Hersteller besteht jedoch in BiGchar-Ofen keine Neigung zur Teerbildung.

### 5.4. Emissionen flüchtiger Verbrennungsgase

#### 5.4.1. Abgassituation bei der *offenen Verbrennung* von Biomasse

Da der anvisierte Anwenderrahmen der mobilen Verkohlung gerade solche Schnittgutbereiche umfasst, die im Zuge von Pflegeeingriffen oft offen verbrannt werden (s. Böschungspflege in Weinbaugebieten oder im Naturschutz), interessierte ein Vergleich der Rauchgasfreisetzung in den Szenarien *Vegetationsbrände* und *Verkohlung per Carbo-Mob*.

Wie bei Vegetationsfeuern liegt auch beim gezielten offenen Abbrand allermeist minderwertiges Material vor. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Schnittgut aus Pflegeeingriffen wie Böschungs-

---

<sup>2</sup> Berechnet man beispielsweise die Oberflächen der 4 Roste, das Volumen der im Idealfall gleichmäßigen, ca. 3 bis 5 cm hohen Schnittgutlage und setzt diese ins Verhältnis zum Gesamt-Raumvolumen, steht das zu einem Zeitpunkt vorhandene Schnittgut-Volumen (127 l) einer Auflagefläche von 2,54 m<sup>2</sup> und einem Feuerraum mit 636 l gegenüber. Man erhält eine zahlenmäßige Schnittgut-Flächenverteilung von 30 – 50 l/m<sup>2</sup> bei 5-fachem Ofenvolumen. Im Vergleich dazu sind Feuerräume von Heizkesseln oft zu klein dimensioniert. Bei typischen Stückholzkesseln (Ref. 8) ist das Verhältnis von Schnittgut zu Ofenvolumen zwar ebfs. ca. 1 : 5, jedoch liegt das Brenngut-Flächenverhältnis mit 140 – 210 l/m<sup>2</sup> viel höher. Mögliche Austauschgrenzen sind somit geringer, was zur Folge hat, dass die Verweilzeit der austretenden Brenngase im Brennraum herabgesetzt ist und die austretenden Abgasmengen (z.B. CO) ansteigen.

<sup>3</sup> In Deutschland wurden ehemals große Vorhaben zur Verschwelung oder Pyrolyse von Müll wieder abgebaut bzw. ins Ausland wie China verbracht (Beispiel: Müll-Schelbrennanlage von Siemens). Die Dioxinproblematik bei früheren Verfahren zur Verschwelung organischer Müllbestandteile konnte Dank anspruchsvoller Grenzwerte und Technik weitgehend ausgeräumt werden (Ref. 15). Es scheint jedoch eine Korrelation zwischen Emissionen und dem Brennstoff-Chlorgehalt gegeben zu sein (Ref. 14).

pflüge, im Naturschutz oder privaten Rahmen per Abbrand vor Ort entsorgt wird. Im Naturschutz könnte das Material zwar zum Ziel besserer Emissionswerte längere Zeit zum Trocknen liegen. Dies ist jedoch durch die Ruhezeiten so eingeschränkt, dass die Entsorgung oft durch Abbrand erfolgt (meist bis Ende März). Aufgrund hoher Feuchtegehalte durch Aufschichten des Schnittguts (Bildtafel 3-2 rechts) oder schnittfrisches Abbrennen (Bildtafel 1-3 bis 1-6) ist von besonders schlechten Emissionsbedingungen auszugehen („Schwelbrände“, Ref. 8). In vielen Landkreisen ist auch das Verbrennen von Getreidestroh, verregnetem Heu und Kartoffelkraut erlaubt, ohne dass ein bestimmter Trockengrad vorgegeben wird (Ref. 16).

Die Arbeitsgruppe Feuerökologie an der Universität Freiburg beschreibt für Vegetationsbrände die grundsätzliche Gaszusammensetzung mit klimawirksamen Komponenten<sup>4</sup>. Zum Zusammenhang zwischen Vegetationsfeuern und Klimawandel wurde erst kürzlich eine Aufsatzsammlung publiziert (Ref. 17). Genaue Werte für einzelne Gase aus offenem Abbrand von Pflegeschnittgut sind in der Literatur im europäischen Rahmen allgemein schwer zu finden. Als Annäherung können Emissionsmessungen aus Vegetationsfeuern von Buschwerk/Strauchdecke im mittleren Westen der USA herangezogen werden. Hier werden Brandgaswerte für Kohlendioxid CO<sub>2</sub> und Kohlenmonoxid CO im Bereich von 1700 g und 90 g pro kg Trockenmasse angegeben, für Feinstaub (PM) bei 11,9 g/kg (Ref. 18).

In einer Schweizer Arbeit zeigten Rauchgasmessungen aus der privaten, offenen Verbrennung von Schlagabraum im Wald, dass die Verbrennung des meist feuchten Holzes (TS = 50 %) zu hohen Emissionen an CO, Kohlenwasserstoffen und Staub führt (Ref. 19, 20). Ausgehend von Emissionsfaktoren der Verbrennung von astigen Holzresten aus Land- und Forstwirtschaft gab das Umweltbundesamt einen Schadstoffausstoß für NO<sub>x</sub> von 1 – 3,1 g/kg und PM von 3,2 bis 12 g/kg Trockenmasse an (Ref. 20). Die Werte sind im Vergleich zu den bei Carbo-Mob gemessenen und den für Feuerungsanlagen gesetzten Werten in Tabelle 6 aufgeführt.

Zum leichteren Anbrennen würden zudem häufig Brandhilfsmittel wie Benzin bis hin zu Altreifen hinzugenommen, was den Schadstoffausstoß deutlich erhöht (Ref. 19). „Bei der Verbrennung des Holzes in einer technischen Anlage gleicher Leistung (rund 500 kW), müssten Emissionsgrenzwerte eingehalten werden, die im offenen Feuer teilweise um mehr als Faktor 5 überschritten wurden“. Aufgrund dessen wird die offene Verbrennung aus Gründen der Luftreinhaltung in einer Schrift des Schweizer Bundesamts für Umwelt, Wald und Landschaft als bedenklich eingestuft und solle „auch wegen der Ressourcenvernichtung verhindert werden“ (Ref. 19).

#### 5.4.2. Abgassituation bei Carbo-Mob mit integrierter BiGchar1000

Emissionsmessungen bei der Carbo-Mob-Anlage erfolgten am oberen Ende des Nachverbrenners durch einen Reinluftspezialisten. Die Messsonde des Testo 350 Flue Gas Analysers wurde dabei in die Kernzone des Abgasstroms gehalten, wo CO<sub>2</sub>-Konzentration und Abgastemperatur (AT) am

---

<sup>4</sup> Ref. 21: „Der bei der Verbrennung freigesetzte Kohlenstoff (Kohlenstoff hat einen Anteil von durchschnittlich 45% des Trockengewichts von pflanzlicher Biomasse) wird zum größten Teil in Form von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), gefolgt von Kohlenmonoxid (CO) freigesetzt. Das Verhältnis von CO<sub>2</sub>:CO hängt von der Vollständigkeit der Verbrennung ab. Bei gut sauerstoffversorgten "heißen" Feuern wird wenig CO emittiert. Bei vorherrschenden Schwelbränden (Pyrolyse und nicht vollständige Oxidierung des Brennmaterials) werden zunehmend Methan und andere Kohlenwasserstoffe freigesetzt, dazu Wasserstoff (H<sub>2</sub>) und vor allem organische Säuren. Durch photochemische Prozesse ("Smog") wird aus CO, Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden (NO<sub>x</sub>) u.a. Ozon (O<sub>3</sub>) gebildet. Neben den gasförmigen Verbindungen werden zusätzlich Aerosole freigesetzt.“

höchsten und der O<sub>2</sub>-Gehalt am geringsten sind. Die Zahlenwerte sind nicht direkt vergleichbar mit Schadstoffgehalten im Abgas zum Zeitpunkt der Freisetzung in die Atmosphäre (Ref. 22), da vom Messpunkt bis zum Austritt am Kaminende noch ein weiterer Verbrennungsraum zu berücksichtigen ist. Die Stoffkonzentrationen sind bei Austritt geringer.

Laut Messprotokoll des Spezialisten wurden bei Holzfeuchten < 25 % und bei gleichmäßiger Beschickung Halbstunden-Mittelwerte von < 100 mg/Nm<sup>3</sup> für **Kohlenmonoxid** CO bzw. von < 350 mg/Nm<sup>3</sup> für **Stickoxid** NO<sub>x</sub> gemessen. Tabelle 5 enthält beispielhafte Augenblickswerte aus zwei Versuchstagen, die auch die schon erwähnten Fluktuationen durch Störungen im Versuchsablauf widerspiegeln (z.B. bei CO = 535 ppm; unregelmäßige Förderbandbeschickung).

**Tabelle 5. Beispielhafte Emissionsmesswerte bei Carbo-Mob (mit Nachverbrenner); vgl. Grenzwerte Kap. 7.1.**

	Messzeiten	Biomasse	CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>
			Vol %	ppm	ppm
Tag 1		TS = 83 %	2,49	37	138
	über		6,83	51	91
	30 min		n.g.	535	125
	hinweg		8,43	464	139
			n.g.	21	138
			n.g.	13	141
Tag 2	12:52:10	TS = 88 %	n.g.	118	174
	12:52:40			102	171
	12:53:00			56	181
	12:54:00			47	192
	12:55:00			36	204
	12:58:00			28	188
	13:07:00			38	152

*Anmerkungen:* Testo-Messsonde in Kernzone des Abgasstroms. Temperaturen zwischen 800 und 850° C. Volumenfluss 400 – 800 m<sup>3</sup>/h. Biomasse: geschredderte Waldholzreste (TS 83 %) und standardisierte Holzhackschnitzel (TS 88 %); Sauerstoff O<sub>2</sub> < 6 Vol %; (Umrechnung ppm in mg/m<sup>3</sup> s. Ref. 22, 54).

**Schwefeldioxid** (SO<sub>2</sub>), flüchtige **organisch gebundene Kohlenwasserstoffe** (OGC) und **Feinstaub** (PM) wurden nicht selbst gemessen. Laut unabhängiger Messberichte im Herstellerland ist SO<sub>2</sub> gewöhnlich unter 0,13 g/m<sup>3</sup>. OGC, eng mit CO korreliert, ist nahe null bei CO-Werten unter 0,2 g/m<sup>3</sup> und PM liegt bei 0,1 – 0,2 g/m<sup>3</sup> unter Normalbetrieb (während der Anlauf- oder Abkühlphase bei 0,2 - 0,5 g/m<sup>3</sup>).

**Dioxine** im Abgasstrom wurden nicht gemessen. Die Bildung dieser Schadstoffe kann generell durch die Ofenauslegung eingedämmt werden (s. Optimierung von Feuerungsanlagen, Ref. 8, 23). In Verbrennungsöfen besteht Dioxinbildungspotenzial, wenn unvollständig ausgebrannter Brennstoff in der Auskühlphase verbleibt (Ref. 23). Die vorliegende Betriebsart bei BiGchar mit kontinuierlichem Partikelaustrag hat jedoch Bedingungen, die die Synthese von Dioxin erschweren.

**PAK** wurde nur im Feststoff Kohle untersucht und unterschritt die in der BioAbf-Verordnung festgesetzten Grenzwerte. Bei naturbelassenem Holz und bei den angestrebten Feuerungsbedingungen (TS-Gehalt Biomasse mehr als 70 %; keine Mitverbrennung von Müll-Abfällen), könnten allgemein bei schlechteren Abbrandbedingungen dennoch Risiken für PAK und Dioxine bestehen (Ref. 24). Die Fracht von PAK hängt aufgrund der Neigung zur Partikelanhaftung mit der

Feinstaubfracht zusammen. **Feinstaubanteile** bleiben nach Aussage des Reingasexperten vorwiegend im Feststoff gebunden, es finde lediglich eine energetische Umsetzung der leicht flüchtigen Bestandteile statt. Nach Erfahrungen des Herstellers des BiGchar1000-Ofens ist die Feinstaubfracht 100 – 200 mg/Nm<sup>3</sup>, d.h. innerhalb der Grenzwerte der TA-Luft). Während der Anheizphase kommt es für ca. 5 –10 Minuten zu sichtbaren Staubfrachten (*particle matter* nach Herstellererfahrung 200 – 500 mg/m<sup>3</sup>) bis der Reaktor auf Betriebstemperatur ist.

Was den Feststoff bei BiGchar angeht, wurden in einer früheren Studie weder Dioxine noch PAK-Belastungen im Fall von verkohltem Heu gefunden (Ref. 25).

Die abluftseitige PAK- und Dioxin Freisetzung muss besonders für kritische Biomassen überprüft werden (z.B. mit hohem Mineralgehalt).

### 5.4.3. Gasfreisetzung bei Carbo-Mob im Vergleich zu anderen Feuerstätten

Tabelle 6 gibt einen Überblick über Emissionen verschiedener Situationen offener und „geschlossener“ Verbrennung von Pflanzenmaterial. Daneben sind die im Projekt Carbo-Mob für Schredderholz- und standardisierte Holzhackschnitzel (TS-Gehalte 80 – 88 %) gemessenen Werte sowie Messwerte und Daten von Pyreg aufgezeigt.

**Tab. 6. Abgasemissionen für Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>), Kohlenmonoxid (CO), Stickoxid (NO<sub>x</sub>), und Feinstaub (PM, *particle matter*) aus verschiedenen Abbränden von Festbrennstoffen im Vergleich**

Art der Feuerung	Leistung [kW] u. Durchsatz (bez. auf TM)	CO <sub>2</sub> [g/m <sup>3</sup> ]	CO [g/m <sup>3</sup> ]	NO <sub>x</sub> [g/m <sup>3</sup> ]	PM [g/m <sup>3</sup> ]	Beschickung	Ref.
Vegetationsfeuer und offene Verbr. (Strauchvegetation)	6 – 10*/m <sup>2</sup> (n.a.)	165 - 180	6,4 - 18**	0,11 – 3,13	1,19 – 12,0	-	18, 20 26, 27
Carbo-Mob -Verk. (Holzschnitzel im Modell BiGchar1000)	240 (80 – 100 kg/h)	3 - 8	< 0,1 (3)**/***	< 0,35	n.g. (0,1 – 0,5) <sup>+</sup>	kontinuierl. (tageweiser Einsatz)	Vgl. Tab. 5
Pyreg – Verkohlung mit FLOX® - Brenner Brenngut n.a.	500 (180 kg/h)	n.a.	a) 0,02 b) 2,0	a) 0,14 b) 0,20	< 0,02	kontinuierl. (7222 h/a)	2, 28
Heuverbrennungs- anlage	10 – 32 (6,4 kg/h) (geschätzt)	n.a.	0,14 - 0,49	0,38 – 0,52	0,19 – 0,3	kontinuierl.	29
Holz Scheit- Kleinfeuerung	7 (kg/h n.a.)	5 - 12	< 0,3 (2,3 - 8)**	n.a.	0,04 – 0,1	chargenw. (bei Bedarf)	8
Hackschnitzel- feuerung (m. Zyklon- Abgasreinigung)	160 (kg/h n.a.)	8 - 11	0,09 - 1	0,23 – 0,29	0,1	automatisch (bei Bedarf)	30

Anmerkungen zu Tab. 6:

Gaskonzentration in g pro Kubikmeter Abgasluft als Nm<sup>3</sup>. Kursiv gedruckte Zahlen sind eigene Ableitungen unter der Annahme, dass sich die aus 1 kg Brenngut austretenden Gase auf ein Abgasvolumen von 10 m<sup>3</sup> verteilen; n.a. = nicht angegeben; n.g. = nicht gemessen; Partikelgröße bei Feinstaub: die als PM<sub>2,5</sub> bezeichnete Staubfraktion enthält 50% der Teilchen mit einem Durchmesser von 2,5 µm.

- \* bei Schätzung von ca. 3 kg TM Pflanzenbewuchs pro m<sup>2</sup> mit einem Energiegehalt von 2,2 bis 2,9 kWh/kg von Biomasse mit 30 % Wassergehalt
- \*\* CO während der Abglimmphase bei Vegetationsfeuern deutlich höher (18 g/m<sup>3</sup>), auch während der An- oder Ausbrandphase bei 7 kW- Kaminöfen (2,3 - 8 g/m<sup>3</sup>) oder bei Carbo-Mob (3 g/m<sup>3</sup>)
- \*\*\* deutliche Schwankungen der Emissionswerte bei Unterbrechung der Versuchsläufe: Kohletrogwechsel oder Beschickungsprobleme am Förderband verursachten sofort schlechtere Emissionswerte (beispielsweise CO-Werte kurzzeitig sogar über 3 g/m<sup>3</sup>); auch der Wechsel zu anderer Biomasse verursachte Schwankungen bis die Laufgeschwindigkeit wieder eingestellt war
- + für PM (Feinstaub) sind in Klammern die Erfahrungswerte des BiGchar-Herstellers angegeben (etwas mehr als 0,2 g/m<sup>3</sup> bei schlechterer Materialqualität)

Im Beispiel Holzschnitzelfeuerung (Ref. 30) sind Verbrennungswerte für naturbelassene Waldhackschnitzel in zwei verschiedenen Anlagenbeispielen gezeigt. Die für Pyreg-Verkohlung abgelesenen Werte entsprechen in a)  $\lambda = 1,08$ , in b)  $\lambda = 1$  (s. Abb.4 in Ref. 28).

Bei den Verkohlungen ist die Brennleistung gegenüber dem Energiegehalt der eingespeisten Biomasse um ca. ein Drittel geringer angegeben, da ca. 33 % der Energiemenge in der Kohle verbleibt. Beim Carbo-Mob-Beispiel wurde höherwertiges Material mit Heizwerten von 4 kWh eingesetzt, in der Realität muss jedoch mit einer geringeren Brennstoffleistung gerechnet werden, da eher minderwertiges Material verarbeitet wird mit Heizwerten bei durchschnittlich 3,5 kWh (Brennstoffleistung hier 240 kW).

### Fazit Emissionen bei Carbo-Mob

Die Auslegung des Ofens begünstigt eine schnelle Reaktion und bewirkt baldiges Ausschleusen der Kohlepartikel, sodass sich keine Schwelvorgänge einstellen. Der Ofen hat daher günstige Ausgangsbedingungen, um mit der schlechteren Abgassituation bei der qualitätsärmeren Biomasse im Anwenderrahmen zurechtzukommen. Die jetzige Entwicklung scheint, mit Hilfe des Nachverbrenners die Abgassituation des Carbo-Mob im Hinblick auf gesetzte Grenzwerte auf eine zufriedenstellende Basis zu bringen (s. nähere Ausführungen in Kap. 7.1.). Gegenüber der offenen Verbrennung, bei der die Schadstoffe ungehindert in die Atmosphäre entweichen, kann von einem deutlichen Verbesserungsfaktor bei der Verwertung durch den Carbo-Mob gesprochen werden.

Gegenüber Vegetationsfeuern sind die meisten Emissionen sehr gering, gegenüber Kaminöfen oder Holzheizungen meist etwas besser (aus bei Heizungen mit Zyklonfiltern). Für Material wie Strauchschnitt oder Schilf waren noch keine Emissionsmessungen möglich. Aufgrund ihrer anderen Inhaltstoffe sind etwas schlechtere Emissionen zu erwarten.

### Maßnahmen zum Ausgleich von Schwankungen im Abgasstrom bei Carbo-Mob

- Die Prämisse möglichst niedriger Abgaswerte (auf möglichst gleichbleibendem Niveau) in Deckung zu bringen mit der Verwertung sehr heterogener Schnittgutsortimente, stellte sich als besondere Herausforderung dar, konnte aber durch folgende Maßnahmen verbessert werden.
- Ein sehr wichtiges Kontrollmoment scheint eine nicht zu starke Materialbeschickung des Ofens zu sein. Lastzustände im Ofen müssen für jedes Brenngut und dessen Eigenschaften (Partikelgröße, Dichte, Feuchte) eingestellt werden. In der Erprobungsphase bei noch unbekanntem Material sind hierfür laufende Sichtkontrollen der Decks nötig (ca. 5-minütig).
- Um die Grundzufuhr schon am Biomasse-Einwurf in den Ofen besser regulieren zu können, half eine Feinregulierung der Laufgeschwindigkeit des Förderbands.
- Die Fernbedienung zeigte sich ein probates Mittel, um das Förderband sofort anzuhalten, wenn Motorüberbelastung drohte (Stopp über 10 mA-Sicherung) oder, um auf kurzfristig entstandene Materialberge in der obersten Ofenetage zu reagieren, die die eigentypischen Luftverhältnisse und Thermik des BiGchar-Ofens stören würden; durch Justieren der Drehhofengeschwindigkeit kann an die Schnittgutqualität angepasst werden

- Da Abgaswerte bei Material unter 70 % TS-Gehalt zu hoch werden, ist es besonders wichtig, auf ausreichenden Trockengrad zu achten.
- Störungen des Luftregimes der Verkohlungsanlage waren anhand von Abgasschwankungen gut ablesbar. Kurzfristig schlugen Stopps einschließlich des Wechselns der Kohletröge stets bei den Emissionsmesswerten zu Buche. Beispielsweise hatte eine zunächst nicht entdeckte Verstopfung im Biokohle-Auslass-trichter Probleme im Luftdurchzug und starke Schwankungen der Abgaswerte zur Folge (innerhalb einer halben Stunde lag die Schwankungsbreite bei CO zwischen 58 und 3000 im Abgasstrom; gleichzeitig stand wolkiger Luftaustritt aus dem Kamin sehr im Gegensatz zum Regelfall der nicht oder kaum sichtbaren Abluft bei regulärem Betrieb).
- Durch eine größer gewählte Kammer könnte die Nachverbrennung sehr wahrscheinlich noch effizienter stattfinden. Der Kostenunterschied wäre gering.

## 5.5. Umweltverträglichkeit von Pflanzenkohle beim verwendeten Schnittgut

### 5.5.1. Prüfung auf Inhaltstoffe und mögliche Schadstoffe

Mehr als zehn Biokohlen, die aus der Verkohlung von Schnittgut unterschiedlicher Regionen zwischen Freiburg und dem nördlichem Bodenseegebiet im Carbo-Mob resultierten (Tab. 7), wurden hinsichtlich wichtiger Inhaltstoffe und Gehalte an Schwermetallen, PAK und anderen Stoffen untersucht. Zum Vergleich mit anderen „Pyro-Kohlen“ können andere Publikationen herangezogen werden (Ref. 31 – 33).

**Tab. 7. Abkürzungen von Pflanzenkohlen, die im Carbo-Mob zwischen 2012 und 2014 hergestellt und getestet wurden; daneben zwei Beispiele für Ausgangsbiomassen (Verkohlungsöfen: BiGchar1000); zum Vergleich Kohlegrus (HVG) und Kohlegranulat aus einem privaten Holzvergaser bzw. kommerziellem Holzkohlehersteller**

<b>Verkohlung von Holz dominiertem Schnittgut</b>	
Biomasse_LaubMW	Holzhackgut aus Laubmischwald
Biomasse_ObstH	Holzhackgut aus Obstockrodung
Kohle_LaubMW	Kohle aus Holzhackgut aus Laubmischwald
Kohle_ObstH	Kohle aus Holzhackgut aus Obstockrodung
Kohle_WeinSt a/b	Kohle aus Holzhackgut aus Weinstockrodung a oder b
Kohle_Fi/Ta	Kohle aus Holzhackgut aus Nadelholzbestand Fichte/Tanne
Kohle_Robi	Kohle aus Holzhackgut aus Robinienbestand
<b>Verkohlung von Schnittgut mit hohem Rindenanteil, Verschmutzung oder Nichtholz</b>	
Kohle_Hainbu	Kohle aus Holzhackgut aus Hainbuchen-Randstreifenpflege
Kohle_Sch	Kohle aus Schilfrohr
Kohle_NatSch	Kohle aus Schnittgut aus Weichholzaufwuchs Naturschutzflächenpflege
Kohle_WildPM	Kohle aus Wildpflanzenmischung
<i>Kohlegrus_HVG</i>	<i>Holzvergaserkohlegrus aus Holzhackgut aus Laub/Nadelholzmischwald</i>
<i>Kohlegranulat</i>	<i>Kohlegranulat aus Holzkohlewerk, käuflich</i>

**Tab. 8. pH-Wert, Asche- und Kohlenstoffgehalte von Biomasse und Kohlen aus der Verkohlung mit Carbo-Mob zwischen 2012 und 2014 (Verkohlungsöfen: BiGchar1000)**

	pH-Wert	Asche		Kohlenstoffgehalt	
		Asche als Glühverlust bei 550° C*	Asche als Glühverlust bei 815° C**	Als Diff. zu GV bei 550° C*	Ermittelt nach DIN EN 13137
in % der Trockensubstanz					
Biomasse_LaubMW	–	0,56	–	–	–
Kohle_LaubMW	9	12,6	–	87,4	74,7
Biomasse_ObstH	–	2	–	–	–
Kohle_ObstH	7 – 7,5	8,8	–	91,2	87,6
Kohle_WeinSt a	7,5 - 8	14,9	11,6	85,1	71,9
Kohle_WeinSt b	8,4	–	–	–	76,9
Kohle_Fi/Ta	–	8,3	–	–	–
Kohle_Robi	–	4,8 - 5,4	3,6	94,6	–
Kohle_Hainbu	6	21,9	19,6	71,1	–
Kohle_Sch	8,9	–	32,6	–	–
Kohle_NatSch	8,3	–	7,7	–	80,4
Kohle_WildPM	8,5	–	18,1	–	–
Kohlegrus_HVG	9,5 - 10,2	28	–	72	–
Kohlegranulat	6	–	–	–	–

\*ermittelt nach Methodenbuch der Bundesgütegemeinschaft Kompost Kap. III B 1.1 (2006), Ref. 34

\*\*ermittelt nach DIN EN 51719

**Tab. 9. Nährstoffgehalte bei Kohlen aus der Verkohlung mit Carbo-Mob zwischen 2012 und 2014 (Verkohlungsöfen: BiGchar1000)**

	CaO (Calcium)	Phosphor als P2 O5	Kalium als K2O	Magnesium als MgO
% TM				
Kohle_ObstH	2,81	0,13	0,59	0,15
Kohle_WeinSt a	3,85	0,36	1,18	0,38
Kohle_WeinSt b	12,6	0,70	2,00	1,60
Kohle_Fi/Ta	2,56	0,15	0,64	0,14
Kohle_Hainbu	6,32	0,53	1,15	0,68
Kohle_Robi	1,52	0,10	0,71	0,12
Kohlegrus_HVG	10,2	0,68	4,99	1,73

**Tab. 10. Schwermetall-Gehalte und Bewertung der Unbedenklichkeit der im Carbo-Mob hergestellten Pflanzenkohlen zur Boden Anwendung nach BioAbfV (Neuentwurf in Klammern)**

	<b>Pb</b>	<b>Cd</b>	<b>Cr</b>	<b>Cu</b>	<b>Ni</b>	<b>Hg</b>	<b>Zn</b>	<i>Bewertung n. BioAbfV</i>
	mg/kg TM							
Biomasse_Laub	<0,5	0,15	<0,5	0,97	<0,5	<0,01	9,14	<i>unbedenklich</i>
Kohle_LaubMW	2,69	0,28	12,6	22,1	9,52	<0,01	124	
Biomasse_Obst	<0,5	0,03	<2	2,58	0,52	0,01	6,14	<i>unbedenklich</i>
Kohle_ObstH	<0,5	0,07	3,6	11,7	2,52	<0,01	13,1	
Kohle_WeinSt a	0,98	<0,02	53,0	58,2	3,29	<0,01	83,3	<i>unbedenklich</i>
Kohle_WeinSt b	<2	<0,2	72,0	48,0	4,80	<0,01	220	<i>unbedenklich</i>
Kohle_Fi/Ta	1,97	0,13	7,8	10,9	7,06	<0,01	85,1	<i>unbedenklich</i>
Kohle_Robi	0,83	0,02	59,7	63,3	3,54	<0,01	36,5	<i>unbedenklich</i>
Kohle_Hainbu	4,17	0,11	27,1	22,1	15,6	<0,01	143	<i>unbedenklich</i>
<i>Kohlegrus_HVG</i>	<i>0,5</i>	<i>0,06</i>	<i>4,86</i>	<i>36,3</i>	<i>28,1</i>	<i>0,01</i>	<i>54,07</i>	<i>unbedenklich</i>
Grenzwert nach BioAbfV Ref. 35	150	1,5	100	100	50	1	400	

*Abkürzungen:* Blei = Pb, Cadmium = Cd, Chrom = Cr, Kupfer = Cu, Nickel = Ni, Quecksilber = Hg, Zink = Zn

Ergänzung: Arsen und Thallium wurden bei Kohlen Sch, NatSch und WPM) untersucht und ergaben Höchstwerte von 3,4 bzw. 0,01 mg/kg TM, d.h. wie alle anderen Werte unterhalb des Grenzwerts (andere Werte s. Ref. 7)

**Tab. 11. PAK-, PCB- und AOX-Gehalte in Kohlen aus der Verkohlung mit Carbo-Mob zwischen 2012 und 2014 (Verkohlungsofen: BiGchar1000)**

	<b>PAK*</b>		<b>PCB</b>	<b>AOX</b>	Bewertung des PAK-Gehalts nach Ref. 36 - 37
	<b>(Hexan)</b>	<b>(Toluol)</b>			
	mg/kg TM				
Kohle_LaubMW	<b>3,1</b>	–	–	–	<i>unbedenklich</i>
Kohle_ObstH	<b>1,4</b>	–	<b>&lt; 0,1</b>	<b>27,5</b>	<i>unbedenklich</i>
Kohle_WeinSt a	<b>3,8</b>	4,6	<b>&lt; 0,1</b>	<b>12,0</b>	<i>unbedenklich</i>
Kohle_Fi/Ta	–	19,3	<b>&lt; 0,1</b>	<b>27,7</b>	?
Kohle_Robi	<b>0,1</b>	–	<b>&lt; 0,1</b>	<b>16,7</b>	<i>unbedenklich</i>
Kohle_Hainbu	<b>&lt; 0,01</b>	–	–	–	<i>unbedenklich</i>
Kohle_Sch	<b>1,6</b>	0,6	<b>&lt; 0,5</b>	<b>30,0</b>	<i>unbedenklich</i>
Kohle_NatSch	<b>8,6</b>	7,3	<b>&lt; 0,5</b>	<b>17,0</b>	<i>unbedenklich</i>
Kohle_WildPM	<b>0,7</b>	1,2	–	–	<i>unbedenklich</i>
<i>Kohlegrus_HVG</i>	<b>12 – 62</b>	165	<b>&lt; 0,1</b>	–	<i>bedenklich</i>
Grenzwerte nach AbfklärV u. BBodSchV (Ref. 36-37)	<b>10*</b>		<b>100**</b>	<b>500 (400)**</b>	

Anmerkung: in der BioAbfV sind keine Grenzwerte angegeben

\*PAK-Vorsorgewert nach VwV Organische Schadstoffe BW bzw. BBodSchV nach § 8, Anhang 4, Tabelle 4.1. (die Angaben sind für humusreiche Böden); als Untersuchungsmethode wurde die für Böden übliche Hexanmethode verwendet; bei der PAK-Bestimmung per Heißextrakt mit Toluol (unüblich für Böden) gibt es oft große Abweichungen zum Hexanextrakt; die Relevanz des Toluol-PAK-Wertes für die Aufnahme durch Pflanzen ist unsicher; dies gilt auch für die Aufnahme von PAK in Gegenwart von Kohle an sich (Ref. 32, 33); die Bestimmung von PAK bei Komposten erfolgt nach der Hexanmethode)

\*\*PCB und AOX-Grenzwert nach AbfKlärV (Aufbringung von Klärschlamm); der Wert in Klammern entspricht dem Neuvorschlag

### Fazit pH-Wert, Asche- und Kohlenstoffgehalt sowie Nährstoffe

Die **pH-Werte** liegen mit 6 – 9 weit auseinander, was für Biokohlen aus verschiedenem Material typisch ist (Ref...). Die im Carbo-Mob produzierten Pflanzenkohlen sind mehrheitlich **basisch**. Die **Aschegehalte** liegen im weiten Bereich von **5 – 32 %**, wobei hohe Gehalte eng mit dem Anteil krautiger oder halmgutartiger Pflanzen (WPM, Sch) oder dem Verschmutzungsgrad des Schnittguts zusammenhängen: anhaftende Erde, Steine bei Material aus der Landschaftspflege (Hainbu) und bei Wurzelstöcken aus der Rebstockrodung. Erwartungsgemäß ist der Aschegehalt hoch bei Holzvergaserkohle. Kohle aus Obstholz und Hackschnitzel aus reinen Waldbeständen haben wenig Asche. Entsprechend hoch sind hier die Gehalte von **Kohlenstoff** mit **91,2 %** bei Obstholz und **94,6 %** beim Robinienbestand. Der **Nährstoffbereich** zeigt keine Auffälligkeiten im Vergleich zu anderen Pflanzenkohlen und liegt für die einzelnen untersuchten Nährstoffe zwischen **15 und 120 g/kg** Kohle. Höhere Phosphorgehalte sind wahrscheinlich ebenfalls auf Erdanhaftungen zurückzuführen. Aufgrund der Lößbodenherkunft spiegelt sich so auch der höhere Calciumgehalt bei Weinstockkohle wieder.

**Fazit Schwermetalle:** Die im Carbo-Mob produzierten Biokohlen weisen keinerlei Belastungen mit Schwermetallen auf.

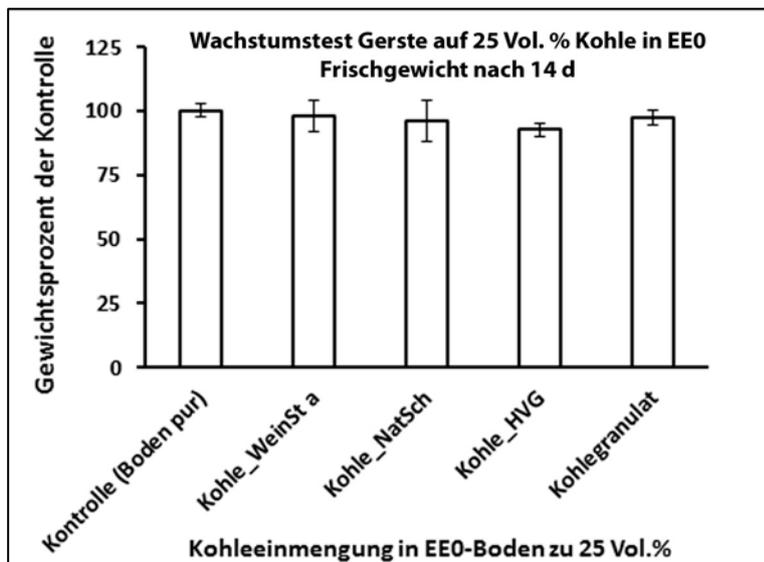
**Fazit PCB, AOX und PAK-Gehalte.** Sämtliche Werte unterschreiten nach den Einschätzungsmethoden für Komposte bzw. Klärschlamm die in Deutschland geltenden gesetzlichen Grenzwerte (Ref. 35 - 38). Für Dioxine s. Kap. 5.4.2. in dieser Studie bzw. Ref. 25.

**Brennwerte (wf, H<sub>o</sub>)** sind teilweise sehr hoch. Sie liegen bei Robinien- und Obstholzkohlen mit 32 MJ/kg am höchsten, gefolgt von Weinstockkohle (29 MJ/kg) und Kohle aus Laubmischwald (28 MJ/kg). Nicht oder wenig verholztes Material ergibt Kohle mit geringeren Brennwerten (Wildpflanzen 25,6 MJ/kg, Schilf 22 MJ/kg). Kohle aus Hainbuchen-Randstreifenpflege (23 MJ/kg) spiegelt wiederum die Herkunft (Straßenrand) wieder.

### 5.5.2. Biotests zur Prüfung der Verträglichkeit der Kohlen bei Pflanzen

Mit einigen Pflanzenkohlen wurden zusätzlich Biotests nach standardisierten Untersuchungsmethoden für Böden und Bio-Abfall durchgeführt (analog zu Vorschriften für Kompost).

Ein **Kurzzeitwachstumstest mit Gerste** erwies keine Beeinträchtigung des Pflanzenwachstums auf 25 % Kohle aus der Rebstockrodung oder jungen Weichholztrieben (Abb. 3). Schädigungen an Blättern waren bei keiner der Kohlen zu beobachten. Die Tests müssen noch mit weiteren Kohlen und Konzentrationen durchgeführt werden.



**Abb. 3: Test verschiedener Kohlen hinsichtlich Pflanzenwachstum.**

Sommergerste (*Hordeum vulgare*) wuchs für 14 Tage nach Aussaat auf Kontrollboden (Einheitserde EE0), in den zu ¼ des Volumens Kohle eingemischt war (s. Methodenbuch der BGK, Ref. 34)



**Biotests mit Regenwürmern** (Regenwurmvermeidungstest mit *Eisenia foetida* nach DIN ISO 17512-1, Ref. 39) wurden noch nicht durchgeführt und werden nach Fertigstellung veröffentlicht (Ref. 7). Komposte, die Kohlen enthielten, riefen positive Reaktionen bzw. keine Vermeidungsreaktion bei Kompostwürmern hervor (Ref. 40). Positive oder neutrale Reaktionen von Regenwürmern wurden auch für andere Pyro-Kohlen berichtet (Ref. 41 - 42).

### 5.5.2. Einschätzung von Risiken hinsichtlich des Schnittguts

Zur Beurteilung, in wie fern sich Risiken ergeben, wenn die Anlage an noch nicht getesteten Schnittgutstandorten mit beispielsweise unbekannter Schwermetallbelastung eingesetzt würde, können neuere Untersuchungen für Grüngut hinzugezogen werden.

Im Hinblick auf die Grüngutdüngung, deren Bodenanwendung als ökologische Düngemaßnahme zum Zwecke der Bodenverbesserung gilt und die ebensolchen Kriterien wie bei Kompost oder Hilfsstoffen wie Holzkohle unterliegt, wird die Schadstoffzufuhr bei Grünguthäcksel in Niedersachsen insbesondere mit Schwermetallen als gering eingestuft (Ref. 43).

In einer Publikation zur Grüngutverwertung aus der Landschaftspflege in Bayern lagen die mittleren Schwermetallgehalte bei Grüngutkomposten unter den Grenzwerten der BioAbfV. In unkompostierten Gartenabfällen und Mähgut aus der Landschaftspflege waren die Schwermetallgehalte bei allen Versuchsstandorten im Vergleich zu Kompost am niedrigsten. Das Landschaftspflegematerial erreichte die Werte der BioAbfV meist nur zu 5 - 15 % (Ref. 44).

In Baden-Württemberg wird Grüngut als ökologische Düngemaßnahme ebenfalls empfohlen. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass Einträge von Grünguthäcksel aus Gebieten mit geogen oder anthropogen vorbelasteten Gebieten (z.B. mit mittelalterlichem Bergbau) getrennt betrachtet werden müssen (Ref. 45). Zudem wird auf Vorsichtsmaßnahmen hingewiesen, die vor allem im Zusammenhang mit der Phytohygiene stehen. Die Anforderungen schließen beispielsweise ein, dass vor allem zur Vermeidung von Nematoden grundsätzlich keine Erde (oft an Wurzeln und Wurzelstöcken anhaftend) enthalten sein soll. Auch sollten wegen der Einschleppungsgefahr von Unkrautsamen grundsätzlich keine krautigen Pflanzen enthalten sein. Zum Unterbrechen möglicher

Infektionsketten (Pilzbefall wie Feuerbrand) sollte Häckselmaterial keine Pflanzen enthalten, die auch der Zielstandort trägt.

Die Resultate bezüglich möglicher Belastungen von Grüngut mit Schadstoffen bieten auch für den Verwertungsweg der Verkohlung Orientierung. Vorgaben wie Grünguthäcksel aus möglichst von Schwermetall unbelasteten Standorten haben zusätzliche Bedeutung für Pflanzenkohle, deren Schwermetallgehalt allein vom Gehalt der Ausgangspflanzen abhängt. Während der Kondensation zu Kohle könnten die Gehalte bei Vorbelastungen zusätzlich ansteigen.

Hinsichtlich möglicher Infektionsrisiken könnte die Verkohlung hinsichtlich der Phytohygiene allerdings von Vorteil sein.

## **6. Bewertung nach ökologisch-ökonomischen Kriterien**

Die Bewertung des Systems „Carbo-Mob“ nach ökologischen und ökonomischen Kriterien ist schwer aufgrund des innovativen Charakters und fehlender Vergleiche. Zum einen ist Biokohle ein Produkt, dessen markt- und rechtsbezogener Rahmen noch festzustellen ist. Zum anderen bestehen noch Unsicherheiten in der Hochrechnung der kleinen Modellanlage auf realistische Dimensionen. Das Potenzial des Konzepts ist anhand von Fallbeispielen wie Rebstockrodung und Schnittpflege von Naturschutzflächen verdeutlicht. Aus der näheren Betrachtung werden so Vorteile, Bedingungen und Grenzen ersichtlich, die den möglichen Erfolgsrahmen aus derzeitiger Sicht aufzeigen.

### **6.1. Ökonomische Bewertung/Diskussion am Fallbeispiel Stockrodung im Weinbau**

Die Arbeit vieler Weinbaubetriebe und Lohnunternehmen im Weinbau ist mit weit voneinander entfernten Einsatzorten verbunden. Bei Stockrodungen, die im 20 – 25 Jahresturnus vorgenommen werden, fällt so sporadisch sehr viel Material an, das aus der Fläche entfernt werden muss. Die Lagerung zur Trocknung und Verwendung in Hackschnitzelheizungen ist jedoch mit Transport, Platzbedarf und erheblichem Arbeitsaufwand verbunden. Oft sind die Umstände, das Material in ein Biomasse-Heizwerk zu bringen, ungünstig: zu hoch die Transportkosten und zu gering der Abnahmepreis aufgrund des verunreinigten und nicht standardisierten Materials. Die Vermarktung des Materials ist daher oft schwierig.

In einer Probeverkohlung in der BiGchar-Anlage stellte sich die Materialunempfindlichkeit in der Tat als großer Vorteil heraus. Durch die hohe Energiedichte ergab sich ein guter Faktor der Kohleausbeute (0,30 für Material mit 70-75 % TS-Gehalt nach 2-monatiger Winterlagerung unter Dach). In Tab. 12 ist die Kosten- und Erlössituation der Hackschnitzeldirektvermarktung derjenigen der Verkohlung für eine Rebstockrodungsfläche von 1 ha gegenübergestellt. Unter a) und b) wird aufgezeigt, welche spezifischen Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit wirken.

**Tab. 12. Vergleich der Erlöse pro ha Weinstockrodung im Fall der Vermarktung des Hackguts als Energie-Hackschnitzel oder nach mobiler Verkohlung und Vermarktung als Biokohle**

Stockrodungshäcksel (vorgetrocknet)	Bezugsgrößen	Kosten und Erlössituation pro ha			
		Vol pro ha	15 - 18 cbm	Direkterlös durch Verkauf von Hackschnitzel bzw. Biokohle	Kosten für Transport zum Abnehmer (incl. Personalkosten von 20 €/h)
TM pro ha	5 - 6 t				
Wassergehalt	30 %				
1 cbm FM	500 kg				
1 cbm FM	350 kg TM				
	<b>Kohleproduktion</b>				
350 kg TM	112 kg TM Kohle				
1 t TM	320 kg TM Kohle				
1 t TM	498 Kg Kohle (LZ)**				
5 – 6 t TM	2,5 – 3 t Kohle (LZ)**				
Vermarktung als Energiehackschnitzel (bei erzielbarem Preis von 15 €/cbm)		<b>225 - 270 €</b>	<b>-200 €* </b>	<b>Fall 1:</b> Verkohlungs- kosten 50 €/h ***	<b>Fall 2:</b> Verkohlungs- kosten 30 €/h ***
Vermarktung als Biokohle (bei Preisprognosespanne 300 - 600 €/t**) Im Beispiel mit 400 €/t berechnet		<b>1000 - 1200 €</b>	<b>-80 €</b>		
Drei fiktive Anlagenkapazitäten mobiler Verkohlung (Durchsatz Rebstockschnitzel: a – c)		a) 200 kg/h	1600 - 1875 €	750 – 900 €	
		b) 300 kg/h	1100 – 1275 €	500 – 600 €	
		c) 400 kg/h	955 – 1087 €	375 – 450 €	
		<b>Szenario: Verkauf als Hackschnitzel</b>	<b>Szenario: Verkohlung und Verkauf als Biokohle</b>		
<b>Möglicher Gewinn/ha</b>		<b>25 - 70 €</b>	<b>a/b) Verluste</b>	<b>b) 460 – 730 €</b>	
			<b>c) – 87 -245 €</b>	<b>c) 616 – 878 €</b>	
<p><u>Anmerkungen:</u> Für eine Vermarktung des Stockrodungsholzes ist in jedem Fall eine Zerkleinerung der Rebstöcke notwendig, deren Kosten in der Aufstellung daher nicht extra aufgeführt werden (dem Beispiel wird ein vorhandener Rebstockhäcksler zugrunde gelegt, der aus einem Ölbaumhäcksler hervorging).</p> <p>*die Kosten können steigen je nach Entfernung zu einer Biomasse-Anlage</p> <p>**Pflanzenkohle nivelliert sich nach Lagerung unter Dach auf ca. 15 % Feuchtegehalt (LZ = Lagerzustand)</p> <p>***pro Tag wird mit 7 h Verkohlungszeit und 1,5 h Auf/Abbau gerechnet (, der jedoch nicht täglich nötig wäre)</p>					

### a) Zwischenfazit Wirtschaftlichkeit beim Einsatz mobiler Verkohlung in der Rebstockrodung

- Aufgrund der **unsicheren Preisprognose** für Biokohle sind derzeit Aussagen über die Wirtschaftlichkeit eines mobilen Systems wie Carbo-Mob schwer zu treffen.
- Bei der Rebstockrodung käme man bei einem Biokohlepreis von 400 €/t ab einer Anlagenkapazität von 200 kg Materialdurchsatz/h auf einen besseren Stand als beim Verkauf als Hackschnitzel.
- Der Einsatz würde sich jedoch am wahrscheinlichsten im Eigenbetrieb lohnen.
- Bei Vorhandensein eines entsprechenden Biokohle-Abnehmers im Umkreis könnte die Verkohlung von Stockrodung deutlich vorteilhafter gegenüber der Bereitstellung als Brenn-Hackschnitzel sein.

### b) Erweiterungen/Einschränkungen

- Auf die Frage, ob Weinstockkohle auch gleich feldfrisch für den betreffenden Rebfeldboden zu nutzen wäre (Stoffkreislauf), ist grundsätzlich anzumerken, dass pure Kohle erst nach Anpassungen (z.B. im Zusammenhang mit Komposten) ihre Wirkung entfaltet; andernfalls ist mit eventuellem Nährstoffentzug zu rechnen (Nährstoffbindekapazität!); bei genügend Platz könnte die Anpassung („Aufladung“) auch am Feldrand erfolgen (z.B. Ko-Kompostierung, s. Ref. 40, 65)
- Kann die mobile Verkohlung für **Aufwandsminderungen** im Lohnunternehmen sorgen? Antwort: Ersparnisse könnten sich dadurch ergeben, dass das Hackgut nicht auf Größen von 4 bis 5 cm Hackschnitzelgröße gebracht werden muss wie bei Hackschnitzelanlagen oft nötig.
- Im mobilen System Carbo-Mob kann ein Teil der **Abwärme für Vortrocknungsprozesse** verwendet werden. Dennoch gibt es Abstrahlungsverluste und natürlich wäre die Effizienz und ökologische Bilanz besser, wenn die Abwärme durchgehend als Fernwärme gebraucht werden könnte. Hierzu müsste jedoch stationär betrieben werden, was die Vorteile der Mobilität zunichte macht. Die Realität vieler dezentral betriebener Bioenergie-Anlagen zeigt außerdem, dass die Bedingungen für die oft geforderte Wärmenutzung aufgrund fehlender Verbrauchsorte meist gar nicht gegeben sind (Problem vieler Biogasanlagen).
- Derzeit steigt außerdem die Nachfrage nach Energiehackschnitzeln und so auch Preise und evtl. Akzeptanz für Minderwertigeres, sodass sich der Aufwand zum nächst gelegenen Heizwerk vielleicht zukünftig eher lohnen würde. Die direkte energetische Verwendung von Restschnittgut als **Ersatz für fossile Energieträger** wäre vorzuziehen, besonders bei der Eigenverwendung und im regionalen Bezug. Die generelle Entscheidungsfrage, ob stoffliche oder energetische Nutzung, ist jedoch nicht nur von wirtschaftlichen Gesichtspunkten abhängig (s. Kreislaufwirtschaftsgesetz, Ref. 46).
- Erlösmöglichkeiten aufgrund des hohen **Einsparungspotentials von CO<sub>2</sub>** bei der Verkohlung (bzw. stofflichen Verwendung von Biokohle) sind noch nicht vorhanden, würden aber deutliche Anreize schaffen. Am internationalen Carbon Credit Markt könnten laut UBA 70 € pro Tonne CO<sub>2</sub> angerechnet werden, wenn die Umweltschäden nach heutigem Wissenstand eingerechnet würden (Ref. 47); bei einer Kohlenstoffeffizienz von 50 % (wie für Carbo-Mob-Verkohlung anzunehmen), würde bei der Verkohlung von 2 t Schnittgut ca. 1 t CO<sub>2</sub> eingespart werden (Ref. 48).
- Das Konzept der Vor-Ort-Verkohlung ist für Stockrodungsschnitzel aufgrund der zu hohen Feuchte nicht direkt möglich. Die Vortrocknungswärme kann den Wassergehalt zwar um einige Prozente senken, jedoch ist die Wasserverdunstung bei größeren Schnitzeln zu langsam. Es wäre daher zu klären, ob das Hackgut bis zum Mindesttrockengehalt von 75 % auf einem nächstgelegenen größeren Platz liegen kann. Aufgrund der **Kleinräumigkeit in Weinbergregionen** scheidet der Feldrand meist aus, sodass auf andere Plätze in der Nähe umgelagert werden müsste (Transportaufwand). Da meist keine Überdachung vorhanden ist, wäre die Verwendung von **Hackschnitzelvliesen** möglich. Die Verkohlung könnte dann in der Tat vor Ort stattfinden, wenn der nötige Trockengrad erreicht ist.
- Das Beispiel wurde bewusst nur mit Rebstöcken und nicht mit Rebschnittmaterial aus Jahresrieben der Reben gebildet. Je nach Bodensituation sollte Rebschnitt als organisches Material

primär als natürlicher Dünger auf dem Feld belassen werden. In neuerer Zeit werden allerdings Probleme aufgrund von Pilzbefall lauter. Der Einsatz einer mobilen Verkohlung wäre daher aus Gründen der **Hygienisierung** in manchen Fällen von Vorteil.

- Je nach bestätigbaren Erfolgen in der Bodenverbesserung kann es sich für den Weinbau auch lohnen, die Verkohlung gleichzeitig als Quelle für **Biokohle für die Verwendung im eigenen Weinberg** durchzuführen. Mögliche Vorteile hinsichtlich diskutierter Parameter (Durchlüftung, Wasserhaushalt, Stickstoffhaushalt usw.) können für den Weinbau jedoch erst nach langfristigeren Beobachtungen für verschiedene Bodenarten angeführt werden. Die Mitverwendung von Kompost scheint in jedem Fall ratsam.

## 6.2. Ökologische Bewertung/Diskussion am Fallbeispiel Naturschutz

Im Beispiel Naturschutz sind die Randbedingungen für anfallendes Schnittgut meist von folgenden Merkmalen gekennzeichnet: das meist **kleinastige** Material muss innerhalb einer gewissen Zeit im Jahresturnus abgeräumt werden. Bis zur Ruhezeit für Tiere (Ende März) wird das Schnittgut daher oft auf der Fläche **verbrannt**, da weder Aufwand noch Kosten für die Entsorgung (Transport zur Schnittgutannahme) zu tragen sind. Liegenlassen oder Mulchen ist aufgrund des Nährstoffeintrags ausgeschlossen, wenn Flächen offen gehalten werden sollen. Zur Verwendung als Heizmaterial findet sich aufgrund der Minderqualität, der sporadisch anfallenden Masse und des hohen Aufwands ebenfalls kein Interesse.

- Wie in einem vom LNV e.V. unterstützten Projekt gezeigt hat, konnten **neue Lösungen für eine natürliche Schnittgutrocknung** gewonnen werden. Hierzu zählen Trockengestelle und der Einsatz von Hackschnitzel- bzw. Kompostvliesen (Ref. 7).
- Wie die Arbeit verdeutlicht, ist der große ökologische Vorteil der mobilen Verkohlung gegenüber der offenen Verbrennung die **Einsparung von Klimagasen und schädlichen Emissionen**.
- Herausragend ist auch die **Unabhängigkeit von Stützenergie-Brennstoffen** im Prozess selbst, da die Reaktion energetisch selbsterhaltend ist.
- Auch sind die derzeitigen **elektrischen Zusatzenergien** gegenüber anderen Biomasse-Anlagen im Leistungsrahmen von 30 – 500 kW geringer: vgl. 0,0068 kWh/kWh Biomasse bei Carbo-Mob mit 0,03 kWh/kWh Heu (Ref. 29, Heuverbrennung) oder 0,0094 kWh/kWh (abgeleitet aus Ref. 49, Pyreg).
- **Einsparpotential Kohlendioxid** durch CO<sub>2</sub>-Sequestrierung: da etwa 50 % des in der Biomasse enthaltenen CO<sub>2</sub> in der Kohle gebunden werden und etwa 80 % des darin enthaltenen Kohlenstoffs zum stabilen Kohleanteil gehören, ergibt sich bei der Verwendung der Pflanzenkohle für stoffliche Zwecke wie der Bodenverbesserung ein deutliches Einsparpotential für CO<sub>2</sub>. Messungen der Haltbarkeit dieses stabilen Anteils von Pyro-Kohle ergaben Werte von 1500 bis über 2000 Jahre. Holzkohle, die in Terra preta-Resten am Amazonasbecken gefunden wurde, wird auf teilweise noch längere Zeiten datiert. Zudem scheint es in der Gesamtschau positive Wirkungen auf **klimawirksame Bodenemissionen** zu geben (Methan, Lachgas) (Ref. 52, 53). Interessant wären die Einspareffekte solcher Gase aufgrund ihrer vielfachen Klimawirksamkeit gegenüber CO<sub>2</sub>. Dies scheint jedoch auch von der Bodenart abhängig zu sein, wie eine Simulation in einem Bodenmodell zeigte (pers. comm. S. Laure, KIT DFIU/IIP). Könnte nach weiterer Bestätigung die Einsparung solcher CO<sub>2</sub>-Äquivalente in die Klima-Rechnung von Pflanzenkohle miteinbezogen werden, würde sich die wirtschaftliche Prognose für „Biokohle-Produktion an Schnittgut-Kleinstandorten“ (kurz: **regionale Biokohle**) schlagartig verbessern. Pro Molekül CH<sub>4</sub> oder N<sub>2</sub>O müsste so ein Mehrfaches an CO<sub>2</sub>-Einsparung anrechenbar sein. Die derzeitige Datengrundlage lässt jedoch keine Festlegung zu.

- Die Frage der finanziellen Anrechenbarkeit dieses Klimabonus wird häufig gestellt. Zwar sind in manchen Ländern schon Strukturen vorhanden, die CO<sub>2</sub>-einsparende Landnutzungsformen fördern (z.B. Agrarumweltprogramm des Landes Baden-Württemberg, s. Förderprogramm MEKAIII und Klimaschutz-Plus), jedoch würden die dortigen Kategorien nicht ausreichen, die für die Herstellung von Pflanzenkohle nötige Kostenkompensation zu erreichen.

Eine Lösung könnten jedoch ähnliche Netzwerke sein wie sie schon in der Ökoregion Kaindorf verwirklicht sind (Ref. 50). Mit einer *freiwilligen, finanziellen Beteiligung von Privaten und Unternehmen bei regionalen CO<sub>2</sub>-Einsparungen in Verbindung mit Biokohle* könnten sich so entscheidende Verbesserungen für einen möglichen Biokohle-Markt ergeben.

- Inwiefern der Einsatz von mobiler Verkohlung Chancen für **geschlossene Stoffkreisläufe** im eigenen Betrieb haben könnte, legt eine neuere Studie mit einem Bio-Obst-Betrieb dar (Ref. 51).

## 7. Rechtliche Rahmenbedingungen

### 7.1. Rahmenbedingungen für Abgasgrenzwerte

Nach den deutschen Richtlinien zur Luftreinhaltung werden Grenzwerte für Emissionen aus Feuerungsanlagen festgelegt. Die Übersicht in Abb. 4 gibt die Zuordnung nach Anlagenleistung und Brennstoff laut Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) wieder. Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) schreibt die Anforderungen für die Immission und Emissionen vor (Ref. 54). Hier geht es um staub- und gasförmige Stoffe sowie um geruchsintensive und bodenbelastende Stoffe. Die TA-Luft ist Grundlage für die Genehmigungsbehörden. Für Verbrennungsanlagen mittlerer Leistungen im unteren Megawatt-Bereich gilt die 4. BImSchV, die den Betrieb von genehmigungsbedürftigen Anlagen vorschreibt.

Beispielsweise liegt bei Festbrennstoffanlagen der 4. BImSchV die Obergrenze für Kohlenmonoxid CO<sup>Fussnote 5</sup> im Abgas bei 0,1 – 0,25 g pro m<sup>3</sup>. Bei Hausbrand-Kaminen, die den Bedingungen der 1. BImSchV (Ref. 55) unterliegen und damit nicht genehmigungspflichtige Anlagen sind, liegt die Obergrenze für CO dagegen bei 2 g/m<sup>3</sup> Abgas.

Leistung MW Brennstoffe	Leistung MW					
	0...1*	1...5	5...10	10...50	50...100	>100
Feste Brennstoffe						
Heizöl EL	1. BImSchV		4. BImSchV		13. BImSchV	
andere Heizöle			TA Luft			
gasförmige Brennstoffe						

Abb. 4. Zuordnung der BImSchV nach Anlageleistung und Brennstoff (Schema entnommen aus Ref. 22)

Die mobile Verkohlungsanlage Carbo-Mob in bestehende Kategorien der BImSchV einzuordnen ist nicht leicht. Aufgrund des neuartigen Ansatzes und der neuartigen Betriebsweise fehlt bisher Vergleichbares. Gemessen am anvisierten Anwenderrahmen und Zielkonzept wären Klassen wie *Abfallbehandlungsanlage* oder *Feuerungsanlage zur Energieerzeugung* nicht zutreffend.

<sup>5</sup> Im menschlichen Körper aufgenommen blockiert CO die Aufnahme von Sauerstoff. Das Gas ist geruchslos.

Einstufungspraxis nach dem Brenngut würde nach der 4. BImSchV zur Kategorisierung „Anlage zur Behandlung von Reststoffen und Abfällen“ führen, wenn gesagt wird, dass der Zweck der Anlage die Beseitigung oder Verwertung von Abfällen ist (Anhang 1 Nummer 8.1 Spalte 2; Ref. 56 Fassung vom 2. Mai 2013). Andere Rohstoffe, nach denen die Eingruppierung dieser Vorschrift für industrielle Anlagen im Bereich Wärmeerzeugung, Bergbau, Energie bis hin zu Nahrungs- und Genussmittel erfolgt, treffen nicht zu, sodass Nummer 8.1 als mögliche Klasse verbleibt (Anlagen zur Beseitigung oder Verwertung fester, flüssiger oder in Behältern gefasster gasförmiger Abfälle, Deponiegas oder anderer gasförmiger Stoffe mit brennbaren Bestandteilen durch thermische Verfahren). Anlagen mit einem Durchsatz über 3 t/h müssen von der zuständigen Behörde (Landkreis) nach den Maßgaben der TA Luft genehmigt werden (Carbo-Mob < 0,4 t/h). In der 4. BImSchV bestehen Emissionsgrenzen wie sie in der TA Luft für solche Anlagen gefordert sind (CO: 0,1 – 0,25 g/m<sup>3</sup>, NOx: 0,35 g/m<sup>3</sup>, PM: 0,15 g/m<sup>3</sup>; OHC: 0,05 g/m<sup>3</sup>). Es gilt das vereinfachte Genehmigungsverfahren für Anlagen unter 3 t/h (8.1.1.4), wenn die Anlage am jeweiligen Entstehungsort der zu behandelnden Abfälle betrieben und nicht länger als 1 Jahr am selben Ort eingesetzt wird (§ 1 Abs. 1 Satz 2).

Die jetzigen Maßgaben der TA Luft für Anlagen nach der 4. BImSchV können im geregelten Anlagenbetrieb des Carbo-Mob laut vorliegender Messdaten und Erfahrungen weitgehend eingehalten werden. Wie erste Messungen vermuten lassen, bestehen Abweichungen bei minderwertigerem Material (weniger Holzanteil), die die engen Grenzwerte der TA Luft teilweise überschreiten würden. Die eingebaute Nachverbrennungstechnik entspricht jedoch den derzeit besten verfügbaren Techniken und kann zudem durch einfache Erhöhung des Kammervolumens in der Reinfluffeffizienz verbessert werden (bei gleichen Investitionskosten).

Vom Zielrahmen her ist die mobile Verkohlungs-Anlage entfernt von bewohnten Gebieten im Einsatz. Die Naturbelassenheit des Verkohlungsguts ist Voraussetzung. Das Zielmaterial umfasst Schnittgut aus der Landschaftspflege, Naturschutz oder Material aus der Rodung von Reb- oder Sonderkulturen, das nicht auf der Fläche verbleiben kann oder für Zwecke der Energieerzeugung nutzbar ist. Von Depositionen im Umkreis des Einsatzortes ist nicht auszugehen. Im Versuchsbetrieb rief die Anlage weder im Gelände noch beim Transport Aufsehen hervor (und stand zu benachbarten Rauchsäulen der Böschungspflege im eindrucksvollen Kontrast). Die Bedienung der Anlage ist einfach und nicht riskant für Verletzungen. Die angebrachten Schutzeinrichtungen erfüllen den Schutzzweck.

Hinsichtlich des Immissionsschutzes kann aufgrund der Messergebnisse und des Konzepts von Emissionsvermeidung und des Beitrags zur effizienten Ressourcennutzung gesagt werden, dass der Anlagenbetrieb keine schädlichen Umwelteinwirkungen hervorruft und ein hohes Schutzniveau für die Umwelt erreicht, dass jedoch bei zukünftig noch strengerer Regelung bezüglich der Grenzwerte (Feinstaub z.B. zukünftig 0,02 g/m<sup>3</sup>) keine Umsetzung möglich wäre.

Zum Vergleich ist die Betrachtung der Grenzwertregelung interessant, wie sie für kleine Feuerungsanlagen gelten. Feuerungsanlagen, die der Wärmeproduktion dienen und meist mit Holz betrieben werden, aber auch für die Verbrennung von Landschaftspflegeheu in Frage kommen (Ref. 29), werden emissionsrechtlich nach der 1. BImSchV (Ref. 55) gehandhabt. Für eine Feuerungsleistung zwischen 4 und 100 kW gelten Emissionsgrenzwerte für CO von 1,0 g/m<sup>3</sup> (bzw. von 0,4 g/m<sup>3</sup> für Anlagen ab 2015, d.h. Stufe 2), für NOx 0,5 – 0,6 g/m<sup>3</sup>, für Staub ist der zukünftige Grenzwert 0,1 g/m<sup>3</sup> (bzw. 0,02 g/m<sup>3</sup> nach 2014).

Für den Betrieb mobiler Verkohlungsanlagen könnte aufgrund einer entsprechenden Brennstoff-Zuordnung auch das Kreislaufwirtschaftsgesetz von 2012 von Belang sein, wo die Hierarchie der Nutzung (stofflich, energetisch) und die Hochwertigkeit der Verwertungsmaßnahmen für Abfälle bewertet werden sollen (Ref. 46). Danach sollen generell solche Wege Vorrang haben, die den Schutz von Mensch und Umwelt nach der Art und Beschaffenheit des Abfalls am besten gewährleisten. Auf der Grundlage der abfallwirtschaftlichen Entwicklung prüft die Bundesregierung noch bis zum 31. Dezember 2016, ob und inwieweit der Heizwert als Maßstab für die Abfallhierarchie herangezogen werden kann.

## 7.2. Rahmenbedingungen für die Verwendung von Pflanzenkohlen

Die Verwendung von Zusatzstoffen zur Bodenverbesserungen ist rechtlich nach der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) zu beurteilen (Ref. 38). Nach den dortigen Bestimmungen sind Holzkohlen „verkehrs-fähig als Ausgangsstoff für Kultursubstrate sowie als Trägersubstanz in Verbindung mit der Zugabe von Nährstoffen über zugelassene Düngemittel, sofern diese Kohle ausschließlich aus chemisch unbehandeltem Holz hergestellt wurde“. Vor diesem Hintergrund steht zwar für Biokohlen anderer Quellen wie zum Beispiel *Strauchschnitt* (mit höherem Rindenanteil und Blattwerk) noch keine eigene Definition zur Verfügung, jedoch liegen in Ländern wie der Schweiz und Österreich seit 2013 schon amtliche, provisorische Bewilligungen für Pflanzenkohlen mit Nichtholzcharakter zur Verwendung als Bodenhilfsstoffe vor. Bemühungen um eine internationale Übereinkunft akzeptabler Quellen und Qualitäten von Biokohle lassen sich in Standardisierungs-Leitlinien der IBI (Ref. 57) und im europäischen Zertifizierungsprojekt ECB finden (Ref. 31).

Anderweitige Verwendungen von Pflanzenkohlen aus der Carbo-Mob-Anlage wie etwa als Brennstoff oder Zusatz zu Holzbrennstoffen (Presslinge, Briketts usw.) wäre in Bezug auf die Bewertung der Umweltverträglichkeit ohne Einschränkung möglich. Abhängig vom Ausgangsmaterial werden hohe Brennwerte erreicht (s. Kap. 5.5.).

## 7.3. Mögliche Regelung des Nutzerrahmens

Für einen nachhaltig ökologischen Einsatz der Technik sind noch weitere Kriterien wichtig. Beispiele sind die Vermeidung von Übernutzung oder Nutzungskonkurrenzen. Auch wenn solche Risiken aufgrund der kleinen Kapazität des Prinzips Carbo-Mob nicht nur äußerst unwahrscheinlich sind (die angezielten Schnittgut-Standorte stehen faktisch nicht in Konkurrenz zur Kompostierung oder der energetischen Verwertung) und auch wenn sich eher Chancen für die Luftreinhaltung ergeben, sollte laut Autorin generell über *Kontrollmöglichkeiten für eine geregelte Nutzung* der neuen Technik nachgedacht werden.

Eine mögliche Empfehlung wäre, den Einsatz mobiler Verkohlung unter Regie zu stellen bzw. so zu regeln, dass Einschränkungen und besondere Bedingungen beachtet werden (Wassergehalt des Brennguts, Wissen über dessen Herkunft und mögliche Vorbelastungen, Kontrolle der Pflanzenkohle usw.). So geht die Frage dahin, solche Anlagen in einem Rahmen zu stellen, wo sowohl Nutzung als auch Kontrolle und Wirtschaftlichkeit besser organisiert werden könnten. Im Anwenderbereich wären Verbände wie Maschinenringe und Landschaftspflegeverbände oder auch enger assoziierte Lohnunternehmen denkbar.

## 8. Argumente für/gegen die Umsetzung mobiler Verkohlung

### Vermeidung der Schadstoffsituation offener Verbrennung

- Trotz Vorsorgeprinzip und sehr ernst genommenem Immissionsschutz mag es verwundern, dass in Deutschland bis dato vielerorts offenes Brennen von Schnittgut erlaubt ist (Böschungspflege, Landschaftspflege, Naturschutz, privater Garten). In solchen Fällen entweichen Emissionen ungehindert in die Atmosphäre (s. Tab. 6). Aufgrund des meist noch hohen Wassergehalts im Schnittgut ist zudem mit noch höheren Schadstofffrachten zu rechnen. Auch während der Verkohlungsversuche an verschiedenen Einsatzorten waren häufig Rauchsäulen in angrenzenden oder entfernten Weingärten und Feldrändern zu beobachten. Die Vermeidung von offenem Abbrand durch andere Entsorgungswege scheint also schwierig zu sein.
- In den Hochrechnungen der UBA-Studie (Ref. 20) werden für die offene Verbrennung in Deutschland Mengen von 35.000 t jährlich verbranntem Schlagabraum und von 4.000 bis 40.000 t jährlich verbrannten Garten- und Parkabfällen genannt. Für die Emissionen würde dies allein im Beispiel Schlagabraum ca. 60.000 t Kohlendioxid, 2.400 t Kohlenmonoxid, bis 100.000 t NO<sub>x</sub> und 420.000 t Feinstaub pro Jahr bedeuten. Angesichts eines etwa 90 %-igen Vermeidungspotenzials solcher klimawirksamen Gase durch die mobile Verkohlung (vgl. Tab. 6) wäre das Prinzip Carbo-Mob daher als sehr vorteilhaft einzustufen. Bei einer rechtlichen Beurteilung mobiler Verkohlungsanlagen wäre daher vorzuschlagen, die möglichen Vorteile für die Luftreinhaltung mit einzubeziehen.

### Anlagen-Kategorisierung fraglich

- Der innovative Ansatz der Vor-Ort-Verkohlung ist eine Mischung aus den Zielverwendungen *Schnittgutverwertung* und *Biokohle-Produktion*. Aufgrund dieses **Mischcharakters** ist die Zuordnung mobiler Verkohlungsanlagen in die vorhandenen Kategorien der Bundesimmissionschutzverordnung schwierig. Weder handelt es sich um Wärmeerzeugung in Haus oder Betrieb, noch um eine Abfallbehandlungsanlage (*nähere Begründung s. unten*).
- Würde das Prinzip Carbo-Mob mangels zutreffender, derzeitiger Klassifizierungsmöglichkeiten jedoch mit hochtechnisierten Anlagen gleichgesetzt (4. BImSchV), wird eine Verwirklichung in Deutschland fraglich, wenn die dortigen sehr strengen Emissionsstandards nicht in allen Details eingehalten werden können (gleichmäßiger Betrieb, evtl. Feinstaub). Noch kostenaufwendigere Reinluftanlagen bei mobilen Anlagen wären aufgrund der engen Wirtschaftlichkeitsgrenzen nicht umsetzbar. Angesichts des geringen Ausstoßes pro Zeit und Einsatzort drängt sich jedoch die Frage der Verhältnismäßigkeit auf, wenn man das Einsparpotenzial von Emissionen gegenüber der offenen Verbrennung berücksichtigt.

### Bessere Ressourcennutzung

- Eine Unschärfe ergibt sich generell aus der Klassifizierung nach dem „**Abfall**“-Begriff, da mit dieser Eingruppierung oft Nachteile für ein wirklich ressourcenschonendes und damit umweltgerechtes Handeln verbunden sind. In diesem Sinn ist die Verwertung von Schnittgut durch mobile Verkohlung keine *Abfall-Entsorgung*, sondern zutreffender als *Umwandlung von Schnittgut als Wertstoff in eine andere Kohlenstoffform mit stabilen Eigenschaften* anzusehen. In

Anbetracht von *Pflanzkohle* als zunehmend gefragtes Hilfsmittel für gartenbaulich-landwirtschaftliche Zwecke, als Güllezusatz (Ref. 58, 59) oder in der Tierhygiene (Ref. 60) und auch als in anderen Bereichen interessanter Stoff (z.B. Boden-sanierung) muss eher von einer **ressourcenschonenden Produktion eines vielseitig einsetzbaren Hilfsstoffs** zur stofflichen Nutzung gesprochen werden (vgl. Ref. 46).

- Obwohl Sortimente wie Strauchschnitt in Bioenergiestudien häufig zum potenziellen Biomasse-sortiment für die thermische Verwertung durch Verbrennung gerechnet werden (Ref. 61), fehlt bei näherer Betrachtung die Umsetzung. Gründe sind weite Wege zur Schnittgutabgabe oder Kosten, die bei der Ablieferung als Gebühren entstehen (z.B. 40 €/m<sup>3</sup> Schnittgut in manchen Landkreisen).

### Phytohygiene

- Für den Problembereich Phytohygiene bei Schnittgut könnte gerade die mobile Verkohlung von Vorteil sein, da durch die hohen Temperaturen Infektionsherde vollständig ausgeräumt werden können. Befallenes Material kann so auf schnellem Weg unschädlich gemacht und die Infektions-gefahr durch Transportvermeidung eingedämmt werden. Dagegen mag der hohe Wassergehalt zum Zeitpunkt des Schnitts sprechen. Der Mindesttrockengehalt des Verkohlungsgutes könnte aber durch Mischung mit mitgeführtem Trockenmaterial eingestellt werden, wie ein annäherungsweiser Versuch mit dem Carbo-Mob zeigte.

### Kein Risiko für Nutzungskonkurrenzen

- Bei der Frage möglicher Nutzungskonkurrenzen hinsichtlich der Kompostierung oder der energetischen Verwendung (Ref. 62 - 64) ist angesichts der *mobilen Verkohlung* keine Gefahr für solche Konkurrenzen erkennbar (Gründe: zu geringes Materialaufkommen; zu entlegene Standorte; zu hoher Verschmutzungsgrad; zu hoher Holzanteil). Bei günstigen Qualitäten und Umständen sollten die genannten Verwertungswege weiterhin an erster Stelle stehen. Interessanterweise kann die fallweise Verwertungsalternative Verkohlung im Gegenteil *Vorteile und sogar Synergien* für die Kompostierung ergeben. Wie sich gezeigt hat, beeinflussen Mischungsvarianten mit Pflanzkohle die Kompostqualität (Ref. 40, 65, 66) und den Rotteverlauf positiv (Ref. 51).
- Wie schon angedeutet, sollte die allgemeine Entscheidungsgrundlage (*ob Verkohlungsgut oder nicht*) nicht nur die der technischen Machbarkeit, sondern auch die der ökologischen Tragfähigkeit sein. Das Einhalten der Prämissen „keine Verdrängung von gesellschaftlich-ökologisch als gut zu beurteilenden Stoffflüssen“ und „kein Induzieren von Stoffflüssen, die zu Übernutzungen führen“ müsste vor einer Einführung der Technik sichergestellt werden (was umso mehr für stationäre Anlagen gilt). Wo es der gesetzliche Rahmen nicht schon vorgibt, sollten nach Ansicht der Projektleitung Grenzen und Chancen der neuen Technik mit den jeweiligen Interessensgruppen betrachtet und im regionalen Bezug Orientierungshilfen erarbeitet werden. Ökologisch kritische Entwicklungen könnten so leichter verhindert werden, während sich tatsächliche Vorteile und Synergien deutlicher abscheiden ließen.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

Nach Beschäftigung mit der Frage der Machbarkeit mobiler Verkohlung kann gesagt werden, dass die Entwicklung des Carbo-Mob-Prinzips viele Voraussetzungen erfüllt, um mit schwierigen Bedingungen einer Vor-Ort-Verkohlung von Schnittgut zurechtzukommen.

Es wurde Schnittgut verschiedenster Herkünfte im Raum Freiburg verkohlt (z. B. Rebstockrodung, Aufwuchs/Naturschutz, Schlagabraum/Wald). Hierbei zeigte sich eine hohe Toleranz gegenüber heterogenem Hackgut, dies bei Partikelgrößen bis 12 cm. Auch mit Fremdkörpern wie Sand, Steinen oder Eisenteilen kam die Technik gut zurecht. Schnittgut wird dabei effizient zu Kohle umgesetzt (ca. 20 bis 30 %). Untersucht nach den Vorsorgeregeln, die auch für die Aufbringung von Komposten gelten (BioAbfV), zeigt das Spektrum der produzierten Kohlen hinsichtlich der Verträglichkeit für Boden und Umwelt keine Auffälligkeiten.

Nachteile der relativ einfachen Bauweise wie Verluste durch Strahlungswärme und Abgasstrom werden wieder wettgemacht durch ökologische Vorteile. Hierzu gehört vor allem das Einsparpotenzial klimawirksamer Abgase gegenüber der offenen Verbrennung, die häufige Praxis in Naturschutz, Böschungspflege oder der Entsorgung von Schlagabraum ist. Durch den Einsatz der Anlage könnten solche Emissionen um ein Zifaches gesenkt werden. Emissionen der Anlage selbst sind im unteren Bereich und zeigen bei regelmäßiger Materialzufuhr und Holzhackschnitzelfeuchten < 25 % in weiten Teilen Übereinstimmung mit den gesetzlichen Grenzwerten.

Die Verkohlungsanlage ist für den Vor-Ort-Einsatz im Feld konzipiert, sodass Primärenergie für den Biomasse-Transport eingespart wird. Aus der Mobilität resultieren jedoch Beschränkungen für die Kapazität und die Komplexität der Abgasbehandlung. Während im mobilen Konzept Carbo-Mob die Komponenten Fördertechnik und Vortrocknung überschaubare Kosten verursachen, ist die Abgasreinigung (Nachverbrenner) schon jetzt ein auffallender Kostenpunkt. Eine noch komplexere Reinlufttechnik mit Zusatzfeuerung, Stützenergie und eventuell Stromverbrauch wäre im anvisierten kleinen Maßstab weder finanzierbar noch aus Sicht der Öko-Bilanz sinnvoll.

Vor dem Hintergrund des Einsparpotenzials von Schadstoffen und der energetisch selbsterhaltenden Arbeitsweise der Anlage erscheint eine Beurteilung der Abgassituation nach den strengen Vorgaben der TA-Luft als fragwürdig. Es findet ausschließlich eine Umwandlung von naturbelassenem Schnittgut statt, das die für den Umwandlungsprozess nötige Energie selbst liefert. Zum anderen wird auf den Einsatz von Stützbrennstoffen zugunsten der Mobilität verzichtet.

Das Mini-Modell (100 kg Schnittgut TM/h) benötigt nur eine geringe Standfläche bei vergleichbar hoher Arbeitsleistung. Solange die Grenzen von Mobilität, Handhabbarkeit und rechtlichen Bedingungen eingehalten würden, wären ähnliche Anlagen größerer Kapazität möglich (Grenzprognose 400 kg Schnittgut TM/h). Mit steigendem Ofenradius wird die Wirtschaftlichkeit wahrscheinlicher (geschätzte Mobilitätsgrenze  $r = 0,75$  m). Auch wenn der Begriff Kleinanlage zutrifft, besteht kein Vergleich zur minimalen Produktivität wie bei Köhlerhaufen oder „Micro-Stoves“, die keine Lösung für den Anwenderbereich bieten könnten.

Mobile Verkohlung könnte in der Tat eine Lösung für „Schnittgut-Orte ohne Verwendung“ sein. Aufgrund des sehr innovativen Charakters und der Prognose-Unsicherheiten für Preise und rechtliche Rahmenbedingungen von Biokohle kann die zukünftige Wirtschaftlichkeit noch nicht eingeschätzt werden. Unzweifelhaft sind jedoch die Chancen für die Umwelt hinsichtlich der ressourcenschonenden Nutzung sowie des Vermeidungspotenzials von Klimagasen.

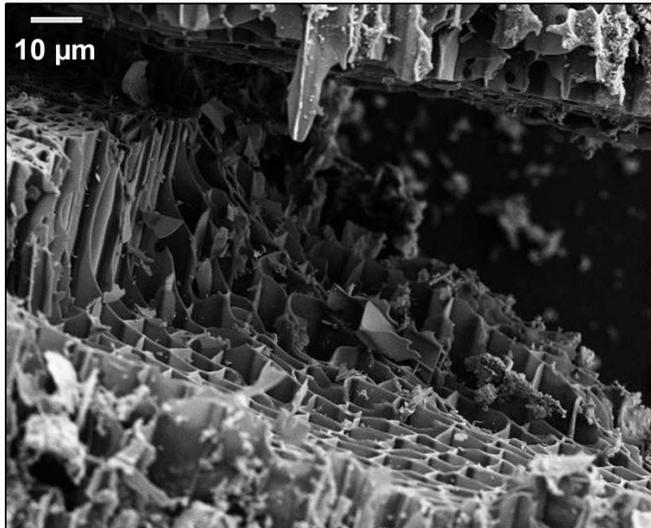
## Literatur

- Ref.1 [Pieplow, Scheub, Schmidt](#) (2013) Terra Preta. Die schwarze Revolution aus dem Regenwald Oekom Verlag, [Stiftungsgemeinschaft anstiftung & ertomis](#) (Hrsg.)
- Ref. 2 [www.pyreg.de](http://www.pyreg.de)
- Ref. 3 Machbarkeitsstudie Biomasse-Pyrolyse, Abschlussbericht (Okt 2010) C. Holweg, [www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche\\_1/stab\\_1/innovationsfonds/abschlussberichte/2010\\_6/2010-12\\_Biomasse-Pyrolyse\\_Abschluss.pdf](http://www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche_1/stab_1/innovationsfonds/abschlussberichte/2010_6/2010-12_Biomasse-Pyrolyse_Abschluss.pdf)
- Ref. 4 [www.terraboga.de](http://www.terraboga.de)
- Ref. 5 [www.blackisgreen.net](http://www.blackisgreen.net)
- Ref. 6 [www.youtube.com/watch?v=oPmFFLxMsYM&feature=endscreen&NR=1](http://www.youtube.com/watch?v=oPmFFLxMsYM&feature=endscreen&NR=1)
- Ref. 7 Studie Verkohlung von Biomasse aus Naturschutzflächen, Abschlussbericht voraussichtlich Mai 2014, C. Holweg, [www.lnv.de](http://www.lnv.de) oder [www.carola-holweg.de](http://www.carola-holweg.de)
- Ref. 8 Untersuchungen zur Feinstaubentstehung und CO-Bildung beim Verbrennungsprozess in chargenweise betriebenen Hausbrandfeuerstätten und Entwicklung emissions- und partikelarmer Feuerungsanlagen (2012), Endbericht W. Juschka, M. Struschka
- Ref. 9 [www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/holzverwendung/051576/index.php](http://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/holzverwendung/051576/index.php)
- Ref. 10 [www.test.de/Kaminholz-Vorsicht-vor-feuchtem-Holz-4301999-0/](http://www.test.de/Kaminholz-Vorsicht-vor-feuchtem-Holz-4301999-0/)
- Ref. 11 Kaltschmitt et al. (2009) Energie aus Biomasse, Springer, 2. Auflage
- Ref. 12 [www.eta-energieberatung.de/upload/downloads/LWF-Merkblatt\\_12.pdf](http://www.eta-energieberatung.de/upload/downloads/LWF-Merkblatt_12.pdf)
- Ref. 13 Staubemissionen aus Holzfeuerungen – Einflussfaktoren und Bestimmungsmethoden (2006) Berichte aus dem TFZ 10, Straubing
- Ref. 14 Umweltrelevante Einflüsse bei der thermischen Nutzung fester Biomasse in Kleinanlagen (2002), [http://www.tec.wzw.tum.de/downloads/diss/2002\\_launhardt.pdf](http://www.tec.wzw.tum.de/downloads/diss/2002_launhardt.pdf)
- Ref. 15 [www.dioxindb.de](http://www.dioxindb.de)
- Ref. 16 Amtsblatt Landkreis Tirschenreuth (2012)  
[www.maehring.de/fileadmin/user\\_upload/Startseite/Bekanntmachungen/Amtsblatt\\_27\\_28.pdf](http://www.maehring.de/fileadmin/user_upload/Startseite/Bekanntmachungen/Amtsblatt_27_28.pdf)
- Ref. 17 Vegetation Fires and Global Change (2013), GFMC, Ed. J.G. Goldammer, Kassel Publishing House
- Ref. 18 Chemical Composition of Wildland Fire Emissions, Urbanski et al. (2009), [www.fs.fed.us/psw/publications/4451/psw\\_2009\\_4451-001\\_079-108.pdf](http://www.fs.fed.us/psw/publications/4451/psw_2009_4451-001_079-108.pdf)
- Ref. 19 Dioxin- und PAK-Emissionen der privaten Abfallverbrennung (2004). BUWAL Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Umwelt-Materialien Nr. 172 Luft, Bern
- Ref. 20 Emissionen aus offener Verbrennung 2013, Teilbericht zum F&E-Vorhaben „Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung - PAREST“, W. Jörß, ITZ, UBA Texte 42
- Ref. 21 [www.fire.uni-freiburg.de/feuroekologie](http://www.fire.uni-freiburg.de/feuroekologie)
- Ref. 22 [www.kometec.de/shop/pdf/fibelrauchgas.pdf](http://www.kometec.de/shop/pdf/fibelrauchgas.pdf)
- Ref. 23 Dioxin- und PAK-Konzentrationen in Abgas und Aschen von Stückholzfeuerungen, (1998), Launhardt et al., Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU), Schriftenreihe StMLU, Materialien Band 142, Münschen
- Ref. 24 Kleinfeuerungsanlagen (2007), BMU: [http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bimschv1\\_hg\\_gesundheit.pdf](http://www.bmub.bund.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/bimschv1_hg_gesundheit.pdf)

- Ref. 25 Gefährdungspotenzial von Biokohle aus Landschaftspflegematerial (Heu) (Abschlussbericht Studie 2011) [www.carola-holweg.de/tl\\_files/carola\\_holweg/images/aktuelle\\_projekte](http://www.carola-holweg.de/tl_files/carola_holweg/images/aktuelle_projekte)
- Ref. 26 Mebust and Cohen (2013) Space-based observations of fire NO<sub>x</sub> emission Coefficients: a global biome-scale Comparison K. Atmos. Chem. Phys. [www.atmos-chem-phys-discuss.net/13/21665/2013/](http://www.atmos-chem-phys-discuss.net/13/21665/2013/)
- Ref. 27 Wooster et al. (2011) Field determination of biomass burning emission ratios and factors via open-path FTIR spectroscopy and fire radiative power assessment: headfire, backfire and residual smouldering combustion in African savannahs, Atmos. Chem. Phys., 11, 11591–11615, 2011
- Ref. 28 [www.ithaka-journal.net/pyrolysereaktor](http://www.ithaka-journal.net/pyrolysereaktor)
- Ref. 29 Bioenergie aus der Landschaftspflege, Vortragsbeitrag 2013 Oechsner: [www4.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/68154/Oechsner.pdf?command=downloadContent&filename=Oechsner.pdf](http://www4.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/68154/Oechsner.pdf?command=downloadContent&filename=Oechsner.pdf)
- Ref. 30 Emissionen und Stoffflüsse von (Rest-)Holzfeuerungen, Mohn 2000, [www.empa.ch/plugin/template/empa/\\*/106692/---/l=1](http://www.empa.ch/plugin/template/empa/*/106692/---/l=1)
- Ref. 31 Biochar Science Network (Vers. 2.3): Richtlinien für den Einsatz von Biokohle im biologischen Anbau, [www.ithaka-journal.net/druckversionen/biokohle\\_richtlinien\\_v2.pdf](http://www.ithaka-journal.net/druckversionen/biokohle_richtlinien_v2.pdf)
- Ref. 32 Quilliam et al. (2013) Is biochar a source or sink for polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) compounds in agricultural soils? Special Issue: Biochar, GCB Bioenergy, [Volume 5, Issue 2](http://www.gcbioenergy.com/Volume5Issue2), pages 96–103
- Ref. 33 Beesley et al. (2011) A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils, [Environmental Pollution](http://www.sciencedirect.com/journal/Environmental%20Pollution) 159(12):3269-82. DOI:10.1016/j.envpol.2011.07.023
- Ref. 34 „Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate“, 1998, grundlegend überarbeitet als Lose-Blatt-Sammlung, fünfte Auflage 2006, Hrsg. Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK)
- Ref. 35 BioAbfV, Bioabfallverordnung vom 21.09.1998: <http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bioabfv/gesamt.pdf>
- Ref. 36 AbfKlärV von 1992 ([http://bundesrecht.juris.de/abfkl\\_rv\\_1992/\\_4.html](http://bundesrecht.juris.de/abfkl_rv_1992/_4.html)), Neuentwurf: <http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/downloads/doc/46373.php>
- Ref. 37 BBodSchV, Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung vom 12. Juli 1999: <http://bundesrecht.juris.de/bundesrecht/bbodschv/gesamt.pdf>
- Ref. 38 DüMV Düngemittelverordnung: [www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d\\_mv\\_2008/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d_mv_2008/gesamt.pdf)
- Ref. 39 Regenwurmvermeidungstest DIN ISO 17512-1: <http://webstore.ansi.org/RecordDetail.aspx?sku=DIN+ISO+17512-1%3A2010>
- Ref. 40 <http://eprints.dbges.de/851/>
- Ref. 41 Busch et al. (2012) Simple Biotoxicity Tests for Evaluation of Carbonaceous Soil Additives: Establishment and Reproducibility of Four Test Procedures. J. Environ. Qual. 40:1-10
- Ref. 42 Liesch et al., Annals of Environmental Science / 2010, Vol 4, 1-9
- Ref. 43 Hinweise zur Verwertung von Grünguthäcksel auf Ackerflächen (2013): [www.lwk-niedersachsen.de](http://www.lwk-niedersachsen.de)
- Ref. 44 Tagungsband Verwertung von Grüngut aus der Landschaftspflege, [www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p\\_19779.pdf](http://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/p_19779.pdf)
- Ref. 45 Breuer, Moltmann, Mokry (2012) Grüngut in der Flächenausbringung – Nutzen oder Schaden? LTZ Augustenberg

- Ref. 46 Kreislaufwirtschaftsgesetz 2012: <http://dejure.org/gesetze/KrWG/8.html>
- Ref. 47 UBA: Ökonomische Bewertung von Umweltschäden S. 68 ff (auf: <http://www.unendlich-viel-energie.de> Stichwort Emissionshandel, Energiewende)
- Ref. 48 Gerber (2010) CO2-Bilanz Grüngutpyrolyse mit Hilfe der PYREG-Anlage: [www.ithaka-journal.net/wpForschung1/uploads//2009/01/sequestrierungspotential.pdf](http://www.ithaka-journal.net/wpForschung1/uploads//2009/01/sequestrierungspotential.pdf)
- Ref. 49 [www.nachhaltigkeit.org/201004164569/natur-landwirtschaft/beitrage/landwirtschaft-als-klimaretter](http://www.nachhaltigkeit.org/201004164569/natur-landwirtschaft/beitrage/landwirtschaft-als-klimaretter)
- Ref. 50 [www.oekoregion-kaindorf.at/index.php/arbeitsgruppen/ag-landwirtschaft](http://www.oekoregion-kaindorf.at/index.php/arbeitsgruppen/ag-landwirtschaft)
- Ref. 51 Studie zur Produktion und Anwendung von Pflanzenkohle im Stoffkreislauf eines Obstbaubetriebs: Pflanzenkohle als Zusatz bei der Kompostierung (2013) Abschlussbericht Dez 2013, C. Holweg, [www.carola-holweg.de](http://www.carola-holweg.de)
- Ref. 52 Wang, Pan, Liu, Zhang and Xiong (2012) Effects of biochar amendment in two soils on greenhouse gas emissions and crop production. Plant and Soil, DOI 10.1007/s11104-012-1250-3, Online First™, 17 April 2012
- Ref. 53 Bruun, Müller-Stöver, Ambus and Hauggaard-Nielsen (2011) Application of biochar to soil and N2O emissions: potential effects of blending fast-pyrolysis biochar with anaerobically digested slurry. European Journal of Soil Science 62: 4
- Ref. 54 TA Luft: [www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund\\_24072002\\_IGI2501391.htm](http://www.verwaltungsvorschriften-im-internet.de/bsvwvbund_24072002_IGI2501391.htm)
- Ref. 55 1. BImSchV: [www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv\\_1\\_2010/gesamt.pdf](http://www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/bimschv_1_2010/gesamt.pdf)
- Ref. 56 4. BImSchV: [www.umwelt-online.de/recht/luft/bimschg/vo/4bv\\_ges.htm](http://www.umwelt-online.de/recht/luft/bimschg/vo/4bv_ges.htm)
- Ref. 57 [www.biochar-international.org](http://www.biochar-international.org)
- Ref. 58 Gülle: Utz (2011) Gülle: Damit es nicht mehr zum Himmel stinkt. Augsburger Allgemeine, Landwirtschaft
- Ref. 59 Schmidt (2011) Güllebehandlung durch Pflanzenkohle. Ithaka Journal 1: 94–97
- Ref. 60 A. Gerlich: Bericht über Pflanzenkohle für die Tiergesundheit: [www.ans-ev.de/News/96/73\\_Symposium\\_des\\_ANS\\_eV.htm%29](http://www.ans-ev.de/News/96/73_Symposium_des_ANS_eV.htm%29)
- Ref. 61 [www.biomasseverband-ooe.at/uploads/media/Tabellen\\_Excelfiles/02\\_d\\_Broschuere\\_Strauch-und\\_Baumschnitt.pdf](http://www.biomasseverband-ooe.at/uploads/media/Tabellen_Excelfiles/02_d_Broschuere_Strauch-und_Baumschnitt.pdf)
- Ref. 62 Positionspapier LNV e.V. zu Bioenergie: <http://lnv-bw.de/lnv-position-mehr-nachhaltigkeit-bei-der-bioenergie/>
- Ref. 63 BUND Einschätzung Terra preta AK Bodenschutz: [http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/sonstiges/130906\\_bund\\_sonstiges\\_bi-okohle\\_terrapreta\\_einschaetzung.pdf](http://www.bund.net/fileadmin/bundnet/publikationen/sonstiges/130906_bund_sonstiges_bi-okohle_terrapreta_einschaetzung.pdf)
- Ref. 64 Stellungnahme des Landtags Baden-Württemberg zu „Terra Preta als CO2-Speicher für den Klimaschutz“ Nov 2013: [http://www9.landtag-bw.de/WP15/Drucksachen/4000/15\\_4290\\_d.pdf](http://www9.landtag-bw.de/WP15/Drucksachen/4000/15_4290_d.pdf)
- Ref. 65 Einsatz von „Biokohle“ in der Landwirtschaft, Mokry et al. (2013), LTZ Augustenberg, Landinfo 4
- Ref. 66 „Biokohle“ -Perspektiven werden überschätzt, Kehres, BGK e.V., H&K aktuell 11/2011 [http://www.kompost.de/uploads/media/Biokohle\\_HuK\\_11\\_11.pdf](http://www.kompost.de/uploads/media/Biokohle_HuK_11_11.pdf)

## Bildtafel 1



Bildtafel 1-1: Zellen des Holzgewebes sind auch in der Kohle noch gut zu erkennen (Holweg, Bühler, Pieles, 2011, EM-Bild von Kohle aus Pyreg-Verkohlung von Landschaftspflegematerial).



Bildtafel 1-2: Kohlestück mit gut sichtbaren Jahresringen; senkrecht dazu dichte Zellreihen



Bildtafel 1-3 Böschungspflege-Feuer im Kaiserstuhl 2007  
(Foto: Norbert Blau, [www.ballonflug.de](http://www.ballonflug.de))



Bildtafel 1-4: Landschaftspflege im Schwarzwald 2012



Bildtafel 1-5: Naturschutzflächen-Pflege nördlich von Freiburg i. Breisgau 2013



Bildtafel 1-6: Pflege von Lößhohlwegen im Kaiserstuhl 2010

**Bildtafel 2 (Abkürzungen s. S 25)**



### Bildtafel 3

**Bildtafel 3-1: obere Bildgruppe mit Wein- und Obststockrodung; Trocknung von Rebstoffckschnitzel unter Hackschnitzelvlies die Verkohlung erweist sich als tolerant gegenüber Sand, Steine und Eisenteile (bis 12 cm); Kohleernte und -trocknung**



**Bildtafel 3-2: unten: Streuobstwiesenpflege; daneben ein Versuch, durch Abbrennen am Feld zu entsorgen; Haufen von Weichholzaufwuchs auf einer Naturschutzfläche; hier auch Schilf- und Wildpflanzenaufwuchs; Acker mit Wildpflanzen**



Bildtafel 4

Bildtafel 4-1 (obere Bildgruppe): Carbo-Mob mit Situationen aus der Anzünd- und Anlaufphase: die drei Kaminbilder wurden im Abstand von 10 min aufgenommen



Bildtafel 4-2: Nachverbrenner; Trockensack und Nachlieferbehälter mit Planen; Kohlelöschröge



Bildtafel 4-2 (Bildgruppe unten): Experimentieren mit einem alten Strohschneider zum Test definierter Stückgröße bei Halmgut; Heu ist zu leicht und müsste in lockerere, kompaktere Knäuel gewickelt sein (ähnliche zu Holzwole-Anzündhilfen?); Heutaler sind jedoch zu fest gepresst für eine vollständige Verkohlung; „Holzkohle“ aus Ta/Fi-Nadeln; Bild unten rechts: freundliche Besucher auf der GeTec-Messe Freiburg 2014

