# **Biotop-Pflege durch Biomasse-Verkohlung**

# Ein Weg zur Vermeidung von Umweltschäden durch offene Verbrennung?

# **CAROLA L. HOLWEG**

Herbst 2012 - Frühjahr 2014



**Bearbeitung**: Nachhaltigkeits-Projekte

Dr. Carola Holweg

Alte Str. 13, 79249 Merzhausen

Tel. 0761-4309741 <u>mail@carola-holweg.de</u> www.carola-holweg.de

# Finanzierung:

50 % LNV, 50 % Eigenbeteiligung





# Studie Biotop-Pflege durch Biomasse-Verkohlung

# 1. Fragestellung

Die Pflege von Naturschutzflächen ist oft aufwendig und mit hohen Kosten verbunden. Mahdund Schnittgut müssen von der Fläche entfernt werden, um einen Nährstoffeintrag zu vermeiden. Verwertungsangebote für bioenergetische Zwecke (Heizmaterial, Biogas) scheinen für viele Flächen keine Lösung zu sein. Bei höherem Holzanteil, wo sich grundsätzlich die Verbrennung anbietet, fehlt oft das nötige Aufkommen pro Fläche, als dass sich der Abtransport samt Einsammeln und Aufladen lohnt. Durch den vermehrten Bau von Biogasanlagen ist die Mitverwendung von Grüngut und silierbarem Material zwar mittlerweile gestiegen, aber die Passgenauigkeit in der Materialbeschaffenheit, im zeitlichen Turnus und der Reichweite ist oft nicht gegeben. So geht die Suche nach Alternativen weiter. Dies scheint insbesondere dort dringlich, wo Schnittgut durch offene Verbrennung entsorgt wird und Rauchgase als klimawirksame Emissionen ungehindert in die Atmosphäre entweichen.

Die Frage stellte sich, ob die neuen Entwicklungen zur Verkohlung ein Angebot für die Schnittgutverwertung aus Naturschutzflächen sein könnten. Holzkohle (Biokohle, Pflanzenkohle) stößt aufgrund besonderer Brenn- und Oberflächeneigenschaften auf das Interesse unterschiedlicher Branchen. Sehr neuartige oder zum Teil wiederentdeckte Verwendungen finden sich zum Beispiel im Gartenbau (Stichwort *Terra preta*, Ref. 1, 2) oder der Tierhygiene (Ref. 3).

Zwei Beispielstandorte der Biotop-Pflege sollten für den Einsatz zweier unterschiedlicher Verkohlungsverfahren geprüft werden. Ein Verfahren, das mit Pyrolyse verwandt ist, stand als mobiles System zur Verfügung, das die Einsparung von Transportkosten erlauben sollte. Das andere Verfahren gehörte zur HTC-Technologie (HTC = hydrothermale Carbonisierung). Die Schnittguttypen stammten zum einen aus der Mahd von Schilfrohr (NSG nördlich des Bodensees), zum anderen aus dem Rückschnitt von Weichholzaufwuchs auf Wiesen (NSG bei Freiburg).

Wirtschaftliche und ökologische Faktoren sollten eingeschätzt und im zweiten Schritt mit dem Ist-Zustand der offenen Verbrennung oder mit anderen Entsorgungen verglichen werden (Häckseln mit anschließendem Abtransport zum zentralen Heizwerk oder zur Kompostierung).

# 2. Einführung in die gewählten Verkohlungstechniken

Für die Vor-Ort-Verkohlung stand eine mobile Technik per Anhängersystem zur Verfügung, genannt Carbo-Mob (Bildtafel 1A). Die mobile Anlage ging aus einem Projekt mit Unterstützung des badenova Innovationsfonds hervor. Hauptkomponente ist ein Modellofen der australischen Firma BiG (Ref. 5). Die Gesamtanlage – in Europa bisher einzigartig – wird im Projektbericht 2014 ausführlich beschrieben (Ref. 4). Die offene Bauweise des Ofens ermöglicht, dass Schnittgutpartikel großflächig bewegt werden und die aus der Verbrennung gewonnene Eigenenergie zur Verkohlung verwendet wird. Bis zu 100 kg Trockenmasse werden pro Stunde verarbeitet. Bei genügend trockenem, holzigem Material (> 75 % Trockensubstanzgehalt TS) entstehen daraus ca. 25 – 30 kg Kohlepartikel. Für die Gesamtökologie ist interessant, dass sich der Prozess vollständig aus der Verbrennungsenergie des Schnittguts speist, der Verkohlungsprozess selbst also keine Zusatzenergie benötigt. Auch die sonst nötigen Zusatzenergien für Förderband und Gebläse (Abgasreinigung) stellen einen sparsamen Verbrauch dar. Zudem wurde die Nutzung eines Teils der



Abwärme zur Vortrocknung von zu feuchtem Schnittgut zugebaut. Die Materialfeuchte ist im hiesigen Klima ein großes Problem für die Verbrennung und Verkohlung. Der Ofentypus selbst hat den Vorteil einer guten Toleranz gegenüber größeren Schnittgutfragmenten. Per 3 m-Anhänger (für 2,5 t) ist die Anlage leicht von einem zum anderen Einsatzort transportierbar. Insgesamt ist die Technik nach relativ kurzer Einübung für die handwerklich geübte Menschen handhabbar.

Als Beispiel für die noch sehr neue **HTC-Technik (hydrothermale Carbonisierung)**, konnte ein Verkohlungstest in einer Versuchsanlage am Rheinhafen in Karlsruhe arrangiert werden (Ref. 6, Bildtafel 1B). Bislang gibt es nur sehr wenige HTC-Standorte, sodass die Frage der grundsätzlichen Verwendbarkeit des Materials an erster Stelle stand. Beim Prozess, der als "Naßverfahren" bezeichnet werden kann, wird Biomasse über mehrere Stunden hinweg bei 20 bar Druck, 80 % wässriger Umgebung und ca. 180 – 200°C gehalten. Der Zellverband und höhermolekulare Strukturen der Biomasse werden dabei zu niedermolekularen Verbindungen abgebaut. Die am Ende resultierende schlammige Masse kann nach Filtern und Trocknen in Form von Biokohle-Staub oder Pressgut verwendet werden. Ein Vorteil der Technik besteht darin, dass feuchte Biomassen Anwendung finden, ohne dass Trocknungsenergie aufgewendet werden muss. Für Schnittgut mit größeren, verholzten Partikeln ist das Prinzip weniger geeignet. Das Verfahren ist technisch aufwendig und daher an einen festen Standort gebunden.

# 3. Herkunft des Schnittguts aus Naturschutzflächen

#### Schilfaufwuchs auf einer Feuchtwiese

In der Roten Liste der gefährdeten Biotoptypen der Bundesrepublik Deutschland sind Schilfröhrichte mit der Gefährdungsstufe 2 – 3 (stark gefährdet bis gefährdet) verzeichnet. Die Pflanze (*Phragmites australis*) ist optimal an die Bedingungen der Land-Wasser-Übergangszone angepasst und wächst daher auch an vielen Feuchtgrünlandstandorten. Sie kann so flächenhaft vorkommen, dass man von "natürlichen Monokulturen" sprechen könnte. Am Teststandort Naturschutzgebiet Kreuzäcker Pfullendorf-Denkingen (BUND, Ref. 7), das aus einer ehemaligen Kiesgrube nördlich des Bodensees hervorging, kommt es in kleinen Mengen zusammen mit Wiesenvegetation vor (Abb. 1).

Die strukturstarke Fläche von ca. 19 ha dient vielen gefährdeten Tier- und Pflanzenarten als Rückzugsgebiet. Die Pflege zur Offenhaltung der Fläche umfasst den jährlichen Schnitt und die Entsorgung des Schnittguts (von Pflegebeauftragten oft "Schilfgras" genannt). Auf benachbarten Riedflächen des BUND wird das Material mittlerweile von einem landwirtschaftlichen BIOLAND-Betrieb für die Biogasherstellung verwendet (Pressung zu Ballensilage). Die Pflegeschnitte können in den Wintermonaten geschehen, sollten aber bis Ende März abgeschlossen sein. Stehendes Schilfgras (Pflegefläche Kreuzäcker) würde über die Wintermonate abtrocknen und wäre grundsätzlich gut für den Verwertungsweg über Pyrolyse geeignet. Im feuchten Zustand käme nur HTC in Frage.





Abb. 1 NSG Kreuzäcker (BUND) zwischen Denkingen und Pfullendorf, Sommer 2012

#### Weichholzaufwuchs auf Wiesen

Auf einem heute 24 ha großen Naturschutzgelände mit Schilf-, Brach- und Großseggenbiotopen am Ostrand des Tuniberges bei Freiburg (NABU, Ref. 8) "ist es gerade der Wechsel zwischen offenen Wiesen, Gehölzstreifen und Baumgruppen, der den ökologischen Wert dieses Areals ausmacht" (Ref. 9). Das Gebiet wurde vom Regierungspräsidium Freiburg 2008 als Naturschutzgebiet "Humbrühl-Rohrmatten" ausgewiesen und ist Rückzugsraum für viele Vogelarten und andere Tiere.

Die Pflege der Gesamtfläche erfolgt im Jahresturnus mit freiwilligen Pflegetrupps. Bis Anfang November werden auch die Weichholzaustriebe an den Wiesengräben und -rändern gekappt und auf mehrere Haufen geworfen (Abb. 2). Die bis zu 1,5 cm dicken Ruten werden bis spätestens Ende März (Beginn der Ruhezeit für Tiere) zur Trocknung liegen gelassen und mangels anderweitiger Verwendung offen verbrannt.





**Abb. 2** NSG Humbrühl-Rohrmatten (NABU) nördlich von Freiburg; Weichholzaufwuchs entlang der Feldränder, der im Turnus entfernt werden muss; Frühjahr 2013

# 4. Testverfahren zur Untersuchung der Kohlen

Zur Bestimmung der Nutzbarkeit der Kohlen als Heizstoff wurden Daten wie Brennwert und Inhaltsstoffe (Asche) erhoben, die für die Verbrennungseigenschaften eine Rolle spielen. Für die Beurteilung einer Verwendbarkeit für Böden müssen aufwändigere Verfahren herangezogen werden. Neben der Bestimmung von Inhaltstoffen und möglichen Gefahrstoffen wie Schwermetallen wurden auch Verträglichkeitstests mit Bodenbewohnern (Regenwürmer) und Pflanzen durchgeführt.

Abbildung 3 zeigt das Testprinzip des Regenwurmvermeidungstests nach DIN ISO 17512. Kommerzieller Standardboden (LUFA 2.2) wird mit pulverförmigen HTC-Kohle gemischt und in einem Gefäß dem einfachen Standardboden ohne Kohle gegenübergesetzt; jedem der fünf Gefäße werden zehn Kompostwürmer zugegeben, die über einen Zeitraum von 24 h in die von ihnen bevorzugte Gefäßhälfte wandern; nach Auszählen der Würmer in jeder Gefäßhälfte kann gesagt werden, ob sich die Kompostwürmer positiv, negativ oder neutral im Vergleich zum Normalboden verhalten.







**Abb. 3** Regenwurmvermeidungstest (DIN ISO 17512)

Abb. 4 Pflanzenwachstumstest nach BGK

Abbildung 4 zeigt den verwendeten Pflanzentest nach Bundesgütegemeinschaft Kompost (Ref. 10). Er wird häufig zur Bestimmung der Qualität von Komposten verwendet. Für den Test wurden die Kohlen zu 25 Vol% mit Einheitserde (EE0) gemischt. Die Mischungen wurden auf je drei Gefäße verteilt. Nach Aussaat von fünfzig Gerstensamen pro Gefäß wurde das Pflanzenwachstum über einen Zeitraum von 12 Tagen beobachtet und auf mögliche Blattschäden kontrolliert. Am Ende werden die Triebe knapp über dem Boden abgeschnitten, das Frischgewicht bestimmt und mit den Kontrollgefäßen verglichen.

Hinweis: Eine Einmischung von 1 % Kohle (d.h. 1 g Kohle TM auf 100 g Boden TM) entspricht ca. 20 t/ha bei einer Einarbeitungstiefe von 15 cm (bei mittlerer Bodendichte; häufige Böden in Süddeutschl.). Versuche zur Bodenverbesserung mit Biokohle werden häufig mit 10 – 20 t Biokohle pro ha durchgeführt.

### 5. Verkohlungsversuche

#### 5.1. Verkohlung von Schilfrohr über HTC (hydrothermale Carbonisierung)

Eine von Röhricht dominierte Wiesenfläche im NSG Kreuzäcker wurde Anfang Dezember 2012 mit einem Maishäcksler gemäht und zerkleinert und zur Probeverkohlung nach Karlsruhe verschickt. Die Stücklänge der Partikel lag zwischen 2 und 8 cm (**Abb. 5**). Die Trockenmasse betrug 66,6 % bei einem pH-Wert von 6,6.

Der Umstand, dass das Häckselmaterial zum Zeitpunkt der Verarbeitung weit höhere Stücklängen als 2 cm hatte, würde in der größeren Anlage zu Problemen in der Transportierfähigkeit führen, da diese mit Pumpen betrieben wird. Die Probeverkohlung wurde daher in einem Testreaktor gefahren, der durch einen einfachen Einfüllmechanismus von oben befüllt werden kann und die grundsätzliche Frage der Verkohlungsreaktion beantwortete. Für die Verarbeitung im großen Reaktor mit mehreren 100 Litern Fassungsvolumen müsste das Material noch stärker zerkleinert werden, was einen weiteren Energieaufwand bedeutet. Eine andere Maßnahme, die zur besseren Pumpfähigkeit eingesetzt werden könnte, wäre die Mischung des Materials mit Flüssiggülle vor der Befüllung des Reaktors.



Die Probeverkohlung endete nach 6 Stunden Laufzeit mit einer Temperatur von 211 Grad Celsius. Das Verkohlungsprodukt wurde getrocknet und zu Pulver gemahlen (Abb. 6). Die beim Prozess entstehende wässrige Phase wurde nicht getestet.





Abb. 5 Zerkleinertes Schilfröhricht NSG Kreuzäcker Abb. 6 Pulverisierte HTC-Kohle (li), beim

**Abb. 6** Pulverisierte HTC-Kohle (li), beim Prozess zurückbleibende Flüssigphase (re)

# **5.2. Vor-Ort-Verkohlung von Weichholzruten über Carbo-Mob** (pyrolytisch)

Die grundsätzliche Machbarkeit hängt hier vom Mindesttrockengehalt des Materials ab. Dieser sollte nach Möglichkeit weit über 75 % liegen. Die für Frühjahr 2013 geplanten Verkohlungsversuche mussten zunächst um ein Jahr verschoben werden, da die Schnittgutfeuchte Mitte März noch bei ca. 40 % lag und die Frühjahrswitterung besonders feucht schien. Um den geforderten Trockengrad zu erreichen, wurden im Folgejahr besondere Strategien angewandt.

#### 5.2.1. Test neuer Trocknungsmethoden von Schnittgut

Im November 2013 wurden einfache **Trockengestelle** aus Holzlatten hergestellt **(Abb. 7)**. Frisch geschnittene Weiden-, Pappel- und Erlenruten wurden gegenüberliegend angestellt, sodass sich ein Lüftungstunnel ergab, der eine schnellere Trocknung herbeiführen sollte **(Abb. 8)**.



**Abb. 7** Bau der Trockengestelle (W. Oberle)



Abb. 8 Schnittgut auf Trockengestellen bis März 2014



Die Bestimmung der Trockengehalte direkt nach dem Schnitt und zum Zeitpunkt der Verkohlung im Frühjahr 2014 zeigte den Erfolg dieser einfachen Methode, insbesondere, wenn mit herkömmlichen Rutenhaufen verglichen wurde (**Tab. 1**). So wies das aufgestellte Material nach vier Monaten 9 – 11 % höhere Trockengehalte auf als der herkömmliche Schnitthaufen (vgl. **Abb. 2**). Hochgestelltes Material hatte Anfang März 2014 nur ca. 30 % Restfeuchte (69,2 % Trockensubstanzgehalt). Im Übrigen überraschte, dass die Restfeuchte allgemein trotz der Wahrnehmung eines "trockeneren Frühjahrs" kaum verschieden zum Vorjahr war.

Auch die neue Trocknungseinrichtung der Carbo-Mob-Anlage (Ref. 4) brachte die Wasserverdunstung voran. Abwärme wird auf das in Gitterbehältern befindliche Schnittgut gelenkt, sodass die darüber liegende, 35-cm-hohe Schnittgutschicht für ca. 20 – 30 min durchströmt wird (Abb. 9). Die Box wird als nächstes über das Förderband geschoben und geleert (Abb. 10). Im Rotationsprinzip wird die nächste Box in die Trockenposition gebracht. Wie Kontrollmessungen der Schnittgutchargen zeigten, konnten hierdurch fast vier zusätzliche Trockengrade gewonnen worden, sodass der TS-Gehalt von ca. 74 % allmählich zufriedenstellend war.



Abb. 9 Schnittguttrocknung mit Abwärme



**Abb. 10** Schnittgut fällt über eine Falltür der Gitterbox auf das Förderband; über 20 cm lange Triebe störten den Transport

Die Sichtkontrolle ergab zunächst vollständig verkohlte Weichholzruten (Abb. 17). Während die zum Anheizen verwendeten, sehr trockenen Hackschnitzel (ca. 85 – 90 % TS) offenbar genügend Energie zur Vortrocknung lieferten, war dies beim weniger trockenen Rutenhack bei gleichen Einstellungen nicht der Fall. Hier hatten viele Partikel noch unverkohlte Kerne. Um eine bessere Trocknung der weiterer Chargen zu erreichen, könnte eine Neujustierung der Luftmischung oder das Drosseln der Transportgeschwindigkeit im Rotationsofen helfen. Besser wäre jedoch eine noch geringere Eingangsfeuchte der Partikel.

Wie ein Nebenversuch zeigte, trocknet gehacktes Gut schneller als ganze Ruten. Dieser Umstand könnte zumindest innerhalb der wärmeren Märztage kurz vor der Verkohlung genutzt werden, Das Hackgut darf dabei nicht zu hoch geschichtet sein, um Verrottungsvorgänge zu vermeiden (< 50 cm). Bei Regengefahr ist auch die kurzfristige Abdeckung mit einem Hackschnitzelvlies möglich. Ein solches Vlies wurde versuchsweise in den letzten Tagen vor der Verkohlung über ein



zusammengefasstes Rutengestell (8 x 6 m) gelegt (**Abb. 11**). Die Steilheit der Vlieswände bewirkt, das Regen vom Gewebe aufgehalten und entlang der Wände abgeleitet wird, während evaporierendes Wasser aus dem Trockengut durch den Stoff hindurch verdunstet. Im Projekt wurden keine Trocknungsvergleiche mit und ohne Vlies durchgeführt, da sich die Verwendung zu spät ergeben hatte. Die Vliese sind jedoch von der Handhabung her problemlos und könnten auch auf Naturschutzflächen für Zwecke der Vortrocknung verwendet werden. Mit Hilfe einer Bodenfolie sollte der Feuchtenachzug aus dem Boden vermieden werden.

**Tab. 1** Trocknungshergang ab dem Schnitt im Nov 2013 bis zum letztmöglichen Entsorgungszeitpunkt (März 2014). Trocknungserfolg durch Gestelle sowie nach Abwärmenutzung in der Carbo-Mob-Anlage

		Ruten im Haufen	Rute	Nach weiterer		
	Schnittzeitpunkt (jeweils Nov)	Mitte März 2013/2014	Ende Jan 2014	Ende Feb 2014	Anfang März 2014	Vortrocknung durch Abwärme
Trockengrad der Ruten in %	47,5	58 - 60	64,7	66,7	69,2	73,3

TS =Trockensubstanzgehalt (Trockengrad)

#### 5.2.2. Vor-Ort-Verkohlung auf der Naturschutzfläche Humbrühl-Rohrmatten

Vorbereitend zur Vor-Ort-Verkohlung erfolgte die Zerkleinerung der Ruten durch eine Häckselmaschine wie in der Landschaftspflege und auf Naturschutzflächen eingesetzt (Abb. 12).



**Abb. 11** Hackschnitzelvlies über Trockengestell



Abb. 12 Zerkleinerung der Ruten mit Häcksler (N. Meier)





Abb. 13 Häckselmaterial aus Ruten



Abb. 14 Die Zerkleinerung war zum Teil unvollständig

Das Rutenhackgut hatte eine Partikelgröße zwischen 1 und 7 cm (Abb. 13). Durch unscharfe Messer war jedoch ein kleiner Prozentsatz längerer Triebstücke mit 20 – 30 cm vorhanden (Abb. 14). Zwar hatte sich der Verkohlungsofen selbst für längere Stückgrößen bewiesen, jedoch störten die Triebe beim Transport aus dem Förderbandbehälter (Abb. 10). Dort setzten sich längere Stücke regelrecht als Querriegel fest und behinderten den weiteren Transport.



Abb. 15 Verkohlung von Schnittgut mit dem Carbo-Mob, NSG Humbrühl-Rohrmatten, Frühjahr 2014

Die Verkohlung im NSG Humbrühl-Rohrmatten fand Anfang März 2014 statt (Abb. 15). Das Förderband und Gebläse wurde durch einen Generator betrieben. Von den Wetterbedingungen her beeinflusste der gelegentlich aufkommende Wind die Luftführung der Anlage negativ. Löschwasser für die glühend ausgetragenen Kohlepartikel wurde dem nahe gelegenen Bach entnommen. Die



Kohleausbeute (Abb. 16, 17) im Verhältnis zum Biomasse-Input lag bei etwa 28 %. Die Stückgrößen der Pyro-Ruten lagen mehrheitlich zwischen 0,5 und 3 cm.



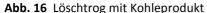




Abb. 17 Verkohltes Schnittgut: Biokohle aus NSG Humbrühl

#### 5.3. Verkohlung von Schilfrohr per Carbo-Mob

Schilfröhricht im NSG Kreuzäcker wies auch bei späten Schnittzeitpunkten (Ende März) aufgrund der Einmischung von Gras noch zu hohe Feuchtewerte für die Probeverkohlung per Carbo-Mob auf, sodass an Stelle dessen abgetrocknetes Material aus einer anderen Quelle bei Freiburg verwendet wurde (Abb. 18). In der Testverkohlung erwiesen sich 10 – 15 cm lange Stücke (Abb. 19) als unproblematisch für den Verkohlungsofen selbst, jedoch neigten die leichten Röhrchen auf dem sehr steilen Förderband (45°) mit nur 1,5 cm hohen Stegen zum Zurückrollen. Bei gutem Brennverhalten und vollständiger Verkohlung lagen am Ende Kohlepartikel in einer Größenordnung von 0,5 bis 3 cm vor (Abb. 20).



Abb. 18 Schilfrohr an Graben

**Abb. 19** Stücklänge 10 – 15 cm

Abb. 20 nach Verkohlung: Pyro-Schilf

Grundsätzlich wäre auch bei Schilfrohr die Trocknung per Trockengestell denkbar. Wie Vorversuche gezeigt hatten, trocknet grün geschnittenes Schilfrohr sehr schnell auf trockenem



Untergrund und bei sommerlichen Temperaturen (einzelne Halme in 2 Tagen trotz Regen von 60 auf 80 % TS-Gehalt).

Ergänzende Anmerkung zur Verkohlung von Heu aus Wiesenmahdgut: schwächeres Halmgut wie zum Beispiel Heu konnte im vorhandenen Aufbau des Carbo-Mob (bzw. BiGchar 1000) nicht erfolgreich verkohlt werden. Die geringe Dichte und damit fehlendes Gewicht behinderten das Fallen des Materials durch den Biomasse-Einfülltrichter, sodass die lockeren Heuknäuel schon im obersten Fach verbrannten.

### 6. Kohle-Analysen und erste Bewertung von Eignung und Umweltverträglichkeit

Der **Brennwert** von HTC-Schilf betrug 20,9 MJ/kg **(Tab. 2)** und liegt damit im Mittelfeld sonstiger HTC-Kohlen. Er ist vergleichbar mit Braunkohlen. Pyro-Kohlen haben höhere Brennwerte. Der von Pyro-Schilf ist mit 22 MJ/kg jedoch gering im Vergleich zu verkohlten Weichholzruten und zu bisher im Carbo-Mob produzierten Kohlen (28 – 29 MJ/kg, vgl. Ref. 4).

Halmgut hat aufgrund seines hohen Mineralstoffgehalts meist viel **Asche**, ein Wert von 33 % wie bei Pyro-Schilf ist jedoch extrem hoch und würde die Verschlackungsgefahr von Feuerungsanlagen stark erhöhen. Laut Anforderungen an Biofestbrennstoffe (Önorm) sollen normierte Holzpellets einen Aschegehalt unter 1,5 % aufweisen. Auch Holzkohle (z.B. Grillkohle) liegt in diesem Bereich. In der Produktnorm EN 14961-6 werden Nichtholz-Pellets aus Stroh mit  $\leq$  6 % Aschegehalt in Klasse A6 spezifiziert, Pellets aus Rohrglanzgras mit  $\leq$  8 % Aschegehalt in Klasse A8. Darüber hinausgehende Aschegehalte gelten als kritisch. Aus dieser Perspektive hätte auch HTC-Schilfkohle mit 11 % Asche einen kritischen Wert. Auch anhand des **Kohlenstoffgehalts** zeigt sich die gute Eignung des Weichholzes für die Verbrennung. Der Gesamtkohlenstoffgehalt (TC) von 81 % überragte den von Pyro-Schilf (61,9 %) sowie HTC-Schilf (47,6 %). HTC-Schilf rangiert dabei auch gegenüber anderen HTC-Kohlen eher auf einem niedrigen Niveau. Beim Gehalt von **Schwermetallen** gibt es im Hinblick auf die Verbrennung bei keiner Kohle Bemerkenswertes. Der Schwefelgehalt von HTC-Schilfkohle (0,058 %) überschreitet geringfügig den Höchstwert (0,05 %) für die Klassifizierung von Miscanthus-Pellets, während sowohl Pyro-Schilf als auch Pyro-Weichholzkohle mit < 0,03 % darunter liegen.

**Tab. 2** Brennwert, pH-Wert, Asche- und Kohlenstoffgehalte von Kohlen aus der Verkohlung von Weichholzruten (Ruten) und Schilf mit Carbo-Mob und aus der Verkohlung von Schilf mit HTC; Bestimmung durch Fremdlabore

	Brennwert	рН-	Asche	Kohlenstoff -gehalt	PAI (Hex.)	(Tol.)	РСВ	AOX	<b>Dioxin</b> PCDD/PCDF
	(Ho)*	Wert	in % der Trockensubstanz		mg/kg TS				ng/kg TS
HTC-Schilf	20,9	5 - 5,5	11*	47,9	0,19		_	-	_
Pyro-Ruten	29,7	7,5 - 8	7,7**	80,4	8,6	7,3	< 0,5	17	< 0,1
Pyro-Schilf	22,0	8,5 - 9	32,6**	61,1	1,6	0,6	< 0,6	30	< 0,1
Vgl. Kohle_Robi	31,7	8,5 - 9	3,6**	_	0,1	_	< 0,1	16,7	_
Vgl. Kohle_ObstH	28,6	7 - 7,5	8,8*	87,6	1,4	_	< 0,1	27,5	_
Hinweise:				Grenzwert	10		100	400	30

Pyro-Schilf und Pyro-Ruten (Weichholzruten) entsprechen in Ref. 4, Tab. 11 "Kohle-Sch" bzw. "Kohle-NatSch" Kohle\_Robi und Kohle\_ObstH sind Pyro-Kohlen aus kommerziellem Hackgut aus Robinienbeständen bzw. aus Stockrodungsholz von Obstbäumen.

Aschegehalt \*ermittelt als Glührückstand bei 550°C, \*\*die Bestimmung bei 815°C führt regulär zu weniger Asche Der Kohlenstoffgehalt wurde ermittelt nach DIN EN 13136

Weitere Angaben zur Analysemethode und anderen Angaben s. Ref. 4, Tab. 8-10 (Dioxin n. AbfKlärV Neuentw.)



Für die Weiterverwendung der Kohlen als Brennstoff spielen auch andere Beschaffenheitskriterien eine Rolle. Während Pyro-Ruten im Schüttverhalten relativ stabil bleiben und wenig Staub entwickeln, ist bei Pyro-Schilf das Gegenteil der Fall.

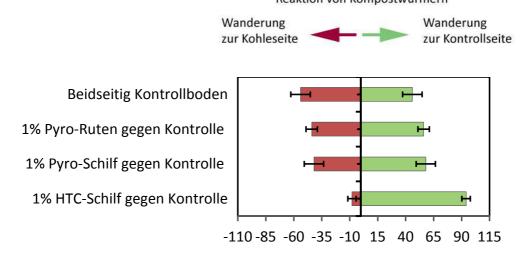
Wenn die Verwendung für land- und gartenbauliche Zwecke diskutiert wird, muss zunächst der Gehalt möglicher Schadstoffe betrachtet werden. Analysen der HTC- und Pyro-Kohlen auf Schadstoffe wie PAK (bei Pyro-Kohlen zusätzlich AOX, PCB und Dioxin) ergaben nach standardisierten Untersuchungsmethoden für Bioabfall keine Bedenklichkeiten (Tab. 2). Dies galt auch für Schwermetalle (Daten nicht gezeigt), wobei die sehr niedrigen Gehalte in Kohlen aus Weichholzruten auffielen. Allgemein kann gesagt werden, dass Pyro-Kohlen häufig vorteilige Eigenschaften haben wie zum Beispiel höhere Kohlenstoffgehalte und pH-Werte. Dies wird auch durch die vorliegenden Kohlen bestätigt. Hinzu kommt die vielfach längere Langlebigkeit von Pyro-Kohlen gegenüber HTC-Kohlen. Eine höhere Stabilität ist für die Bodenverwendung und nachhaltige C-Sequestrierung von Vorteil, da so der Kohlenstoffgehalt für lange Zeit angehoben wird. Die Pyro-Kohlen zeichnen sich zudem durch eine meist sehr hohe Oberfläche aus. Die innere Oberfläche der Kohlen aus den beiden Naturschutzflächen wurde nicht eigens gemessen. Für Holzkohlen wurden jedoch oft Werte zwischen 300 und 600 m<sup>2</sup> pro Gramm beobachtet, die Werte für HTC-Kohlen sind viel kleiner. Da die Pyrolyse die Anordnung der Pflanzenwände nicht zerstört, sind zudem noch viele Großporen im Bereich von 10 µm enthalten, die den Habitatansprüchen von Mikroorganismen entgegenkommen mögen. Auch Wurzelhaare von Pflanzen, die wichtig sind für die Wasser- und Nährstoffaufnahme, haben ähnliche Dimensionen.

Bekannt sind die Bindekapazitäten aller Kohlen für Nährstoffe und Wasser. Sie werden meist als Hauptvorteile in der Bodenverwendung gesehen. Auch in der Tierhygiene wurden erste Erfahrungen mit Pflanzenkohlen gesammelt (Ref. 3). Hier erweist sich die Pyro-Kohle als Adsorber für Schadstoffe oder wirkt ausgleichend auf die tierische Verdauung (bekannt von Aktivkohle).

#### Verträglichkeit der Kohlen bei Regenwürmern und Pflanzen

Im Test der **Vermeidungsreaktion von Kompostwürmern** zeigte sich für Pyro-Kohlen aus Schilf (Pyro-Schilf) oder Weichholzruten (Pyro-Ruten) kein verändertes Verhalten gegenüber reinem Boden **(Abb. 21)**. Die Wanderung scheint mehr zur Kontrollseite zu tendieren, sind im statistischen Test aber nicht signifikant.

Reaktion von Kompostwürmern

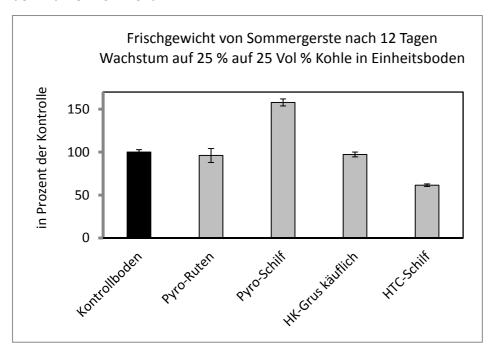


**Abb. 21:** Regenwurmvermeidungstest nach DIN ISO 17512. Kohlen wurden zu 1 g/100 g Boden eingemischt. X-Achse: Prozentsatz Wanderungsrichtung.



Die Vermeidungsreaktion im Fall der HTC-Schilfkohle entspricht der allgemeinen Beobachtung, dass HTC-Kohlen meist schlechter als Pyro-Kohlen abschneiden. Die Fluchtreaktion auf HTC-Schilfkohle ist schon bei geringer Konzentration (1 %) deutlich negativ (Anmerkung: eine 1 %-ige Mischung entspricht je nach Bodendichte einer Auftragsmenge von 10 bis 20 t Kohle pro ha bei einer Einarbeitungstiefe von 10 cm). Der Grund ist noch nicht genau bekannt, könnte aber mit den organischen Resten zusammenhängen, die prozessbedingt noch im Feststoff vorhanden sind (z.B. versch. organische Säuren). Wie eigene Vorversuche gezeigt haben und auch andere Arbeiten belegen (Ref. 11, 12), bauen sich organische Verbindungen aus HTC-Kohlen nach Lagerung oder Vorbehandlung ab (z.B. durch Ko-Verrottung mit Kompost), sodass Reaktionen von Tier und Pflanze positiver ausfallen.

Für einen standardisierten, kurzzeitigen Verträglichkeitstest mit Pflanzen (Abb. 22) wurden die Kohlen zu 25 Vol% mit Einheitserde gemischt. Das Frischgewicht von Pflanzen, die auf 25 % Pyro-Ruten oder Kohlegrus (Holzkohlen-Großhandel) gewachsen waren, unterschied sich nicht vom Kontrollansatz ohne Kohle. Bei Pyro-Schilfkohle gab es einen deutlichen Wachstumsschub, der mit den kurzfristig verfügbaren Mineralstoffen zusammenhängt (s. hoher Aschegehalt). Bei HTC-Schilf war das Wachstum deutlich reduziert. Offenbar wirkten Bestandteile dieser Kohle in der Keimphase der Pflanzen hemmend.



**Abb. 22** 

Test verschiedener Kohlen auf Verträglichkeit im Keimpflanzenversuch mit Sommergerste (kurzzeitiger Test nach Methoden der Bundesgütegemeinschaft Kompost, Kap. IV A 3.1)

Anmerkung: obiger Pflanzentest, der meist bei Komposten durchgeführt wird, ist weniger zur Ermittlung zukünftiger Erträge als zum Feststellen von Empfindlichkeiten auf Inhaltsstoffe der Prüfsubstrate geeignet. Unter Feldbedingungen (wie allgemein bekannt und auch für unterschiedliche Pflanzenkohlen einschließlich HTC-Kohlen bestätigt) sind im Kurzzeittest aufgetauchte Begleiterscheinungen oft nicht zu beobachten beziehungsweise nach einiger Zeit ausgeglichen. Dies gilt auch für die Reaktion von Regenwürmern.



# 7. Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit

Im Folgenden wird die Wirtschaftlichkeit von Entsorgungswegen gegenübergestellt, die am Standort Humbrühl generell in Frage kämen: **offene Verbrennung, mobile Verkohlung, Energieerzeugung, Kompostierung.** Um bei den tatsächlichen Standortsverhältnissen zu bleiben, beziehen sich die Angaben der Tabelle 3 auf einen **4-cbm-Haufen aufgeschichteter Ruten.** 

Tab. 3 Verwertungs- und Nachfolgekosten/erlöse von 4 cbm Weichholzruten; daneben Vergleich der Umweltkosten (4 cbm als häufiges Mengenaufkommen bei Naturschutzflächen- oder Streuobstwiesenpflege)									
Ca. 670 kg TS Ausgangsmenge 1500 kWh		Verar- beitungs- kosten vor Ort	Häcksler- kosten vor Ort	Aufla- den + Trans- port	Erlöse b. Ab- gabe am Werk	Gewinn bei Verkauf (im Fall B Kohle, bei C, D Schnittgut)	Wirtschaft- lichkeit ( <b>ohne</b> Umwelt- kosten)	Umwelt- kosten bei der Verarbei- tung	Wirtschaft- lichkeit ( <b>mit</b> Umwelt- kosten)
		а	b	С	d	e1 e2	f1 f2	g	h1 (h2)
A) offen Verbren		-66	-	-	-	-	-66	-275	-341
B) mobi Verkohl		-240	-150	-	-	405 287	66 (-103)	-37	29 (-140)
C) Thern Energies		-	-	-208	8	48	-153	-22	-175
D) Kompos	tierung	-	-	-208	-20	9	-219	0	-219
			Erläuterunge	n: Koster	n mit Minus	, Erlöse ohne Vo	rzeichen		
а	Personenaufwand, den man für ein 3-stündiges Abbrennen veranschlagen müsste (für die Betreuungsarbeit des Abbrennens wird ein geringerer Stundensatz angenommen, d. h. 22 €/h nach Maschinenringsatz); Kosten für die Verkohlung (Personal-, Betriebs- und Investitionskosten auf 15 J.); Anlagenkapazität Verk. 150 kg/h								
b	Kosten laut Lohnunternehmer der Landschaftspflege nach Sichtung von Standort und Menge								
С	Die Kosten steigen laut Landschaftspflegebetrieb bei sperrigerem Material schnell an (Baumschnitt Kirsche, Apfel, Walnuss etc.); Entfernungsannahme 25 km								
d	Aufgrund des ähnlichen Heizwerts zu Weinstockschnitzel (Ref. 4) wird ein Abnahmepreis von 15 €/cbm eingesetzt (nach Angabe für Weinstockschnitzel eines Lohnunternehmers)								
е	Gewinne beim Verkauf als "Bodenkohle" (B) e1: 2,7 €/kg; e2: 2 €/kg; darin jeweils 0,5 €/kg für lokalen Vertrieb; s. Weiteres im Text); C) Gewinne, die im Werk selbst entstehen (Wärme + Stromverkauf minus Gestehungskosten 3,5 ct/kwh; D) bei Massenkompost wird üblicherweise der Nährstoffwert angesetzt; Massenverlust mind. 40 %, Herstellungskosten nicht bekannt)								
f	A: Die offene Verbrennung ist durch die meist ehrenamtliche Tätigkeit nur rein finanziell kostenneutral (für die Gesellschaft müssen jedoch Umweltkosten verbucht werden); B: f1 und f2 korrespondieren mit e1 und e2								
æ	Umweltkosten nach UBA 2012 (Ref. 14) für thermische Energieerzeugung, 80 % Wirkungsgrad (Bezug auf Rauchgase wie NO <sub>x</sub> , PM, SO <sub>2</sub> , NH <sub>3</sub> , NMVOC; für Biomasse werden hier 1,88 ct/kwh bei der thermischen Energiegewinnung angegeben); von hier aus Vergleiche möglich mit offener Verbrennung (Einsparfaktor 10) und mobiler Verkohlung (Einsparfaktor 2), s. auch Tab. 4								
h	Das große Minus bei der Energieerzeugung und der Kompostierung kommt von den Abholungskosten								

Anmerkung: Die Zahlen in Tab. 3 können nur für ähnliche Standorte herangezogen werden, d. h. wo es um begrenzte "Erntemengen" pro Eingriff geht. Bei größeren Aufkommen pro Fläche kann das Verhältnis zwischen Aufwand vor Ort und Erlös- und Gewinnmöglichkeiten besser sein. Auch ist die Höhe der Investition einer mobilen Verkohlungsanlage noch nicht genau bekannt; Erfahrungswerte f. Betriebsstundenkosten fehlen. Umweltkosten sind zwar keine Kosten für den Flächeninhaber, dafür aber für die Gesamtgesellschaft. Die Betrachtung ist zusätzlich und bezieht sich auf einen weiteren ökologischen Rahmen; die langfristige CO₂-Bindung bei Pflanzenkohle noch nicht gewertet (aufgrund vermiedener Umweltschäden wären 42 € anzurechnen).



In Tabelle 3 werden zunächst Verarbeitungskosten aufgelistet (a). Zum Entsorgen durch Feuer (A) wurde ein Stundensatz angesetzt, der fiktiv ist, da diese Arbeit ehrenamtlich erledigt wird. Bei der Vor-Ort-Verkohlung (B) entstehen zunächst hohe Kosten durch den Verwertungsprozess. Wird die vorausgehende Zerkleinerung an ein Landschaftspflegeunternehmen vergeben, bedeutet dies beträchtliche Zusatzkosten (b). Unter der Annahme, dass das Material für die Verwertungswege Energiegewinnung (C) und Kompostierung (D) roh, also nicht gehäckselt, abgegeben werden kann, erübrigt sich das Zerkleinern vor Ort, jedoch wird allein das Aufladen samt Abtransport (c) zu einem hohen Kostenpunkt. Der Arbeitsschritt kann ehrenamtlich nicht bewältigt werden, sodass ein Unternehmen beauftragt werden müsste. Die Selbstabholung zur eigenen Nutzung ist nahezu auszuschließen, da dies Zerkleinerung, Trocknung, Aufbewahrung und eine zum Schnittgut "passende" Heiztechnik voraussetzt. Bei der mobilen Verkohlung entfällt Schritt c, da die Kohle mit der Anlage selbst bzw. dem Zugfahrzeug mitgenommen wird. Gegenüber ehemals 4 cbm wären nur noch 400 Liter abzutransportieren (% Volumenrückgang Haufen > Häcksel > Kohle: 100 > 35 > 10).

Die Ausgaben für (c) im Fall der Energiegewinnung und Kompostierung stehen in keinem Verhältnis zu den fehlenden oder geringen Erlösen bei der Abgabe am Heizwerk oder Kompostplatz (d). Während die Möglichkeiten der Kostenkompensation für den Pflegebeauftragten am Werktor enden (der nachfolgende Markt Energie und Kompost ist abgekoppelt zu betrachten), hat die Verkohlung durch den Biokohleverkauf (e1, e2) weitere Erlösmöglichkeiten. Für den Vertrieb der Kohle werden aufgrund von direkteren Verkaufswegen keine üblichen Handelsbedingungen vorausgesetzt (also nicht Einkaufspreis + 100 %, sondern 0,5 €/kg).

Mobile Verkohlung wäre nur auf Basis entsprechend hoher Kohlepreise wirtschaftlich. Erst bei einem Reinerlös von 2,2 € pro kg Kohle (zwischen g1 und g2) lohnt sich der Einsatz einer Anlage mit einer Verarbeitungskapazität von 150 kg/h. Im probeweisen Verkauf bestätigte sich, dass Hobbygärtner den Preis (incl. fiktiver Vertriebskosten) durchaus akzeptieren, denn auch im Kleinhandel für Grillkohle kommen solche Preise vor. Die Zerkleinerungsarbeit stünde dem Verbraucher dabei noch bevor, während die Pflanzenkohle meist schon passende Stückgrößen hat. Der Wert von Biokohle kann keineswegs mit herkömmlichen Preisen für Energiekohle (Steinkohle, Braunkohle) verglichen werden. Bei Biokohle für Bodenzwecke sind Porosität, Dichte und Langlebigkeit sind Beispiele vieler wertgebender, stofflicher Eigenschaften der Biokohle, die einen viel höheren Preis rechtfertigen, als auf Basis von MJ/kg zu berechnen wäre. Im Energiesektor spielt bei manchen Firmen der Bezug zur Nachhaltigkeit und Regionalität eine so große Rolle, dass auch hier andere Einkaufspreise akzeptiert werden, als es der pure Energiewert zuließe.

Bei Kompost herrscht eine große Diskrepanz zwischen Wert und Verkaufspreis. Der übliche Preis von ca. 5,80 € pro Tonne FM (Frischmasse) bildet den umfassenden Nutzen des organischen Materials gar nicht ab (die übliche Berechnung nach Nährwert bezieht sich allein auf die enthaltenen Mineralstoffe und lässt andere positive Eigenschaften von Kompost für den Boden außen vor: Strukturmaterial, Förderung der Bodenlebewesen wie Regenwürmer usw.).

#### Vergleich der Umweltkosten und vermiedenen Umweltschäden

Der kostengünstigste Weg scheint die Entsorgung durch Feuer zu sein, da durch die ehrenamtliche Arbeit keine Zahlungen nötig sind. Emissionen und nachfolgende Umweltschäden verursachen jedoch Umweltkosten (Ref. 14), die die Gesellschaft langfristig zu tragen hat und besonders bei der



offenen Verbrennung ins Auge stechen. Aufgrund freigesetzter Rauchgase verursacht der Abbrand von 4 cbm Rutenschnitt Umweltkosten in Höhe von 275 €. In Energiegewinnungsanlagen¹ können die Emissionen durch Rauchgasbehandlung im Mittel auf etwa 10 % gesenkt werden (häufige Angabe für die Effizienz, vgl. auch Tab. 4). Gegenüber den aufwändigen Installationen in Kraftwerken ist die Effizienz des im Carbo-Mob installierten Nachverbrenners zwar etwas geringer (vor allem wenn schlechteres Material verkohlt wird), bringt aber gegenüber dem offenen Brand immer noch große Verbesserungen (Drosselung der Rauchgase auf 13 – 20%). Die Verbrauchswerte des Carbo-Mob für den Betrieb von Gebläse und Förderband (kwh/kwh Biomasse mit 3,5 kwh/kg) liegen unter denen anderer thermischer Biomasse-Anlagen (vgl. S. 34 Ref. 4). Hervorzuheben ist vor allem der Verzicht auf Stützenergie zum Betrieb des Ofens (bei Feuerungsanlagen oft nötig). Die Umweltkosten durch den Betrieb der Anlage sind daher gering.

Beim Kompostweg wären die Umweltkosten am geringsten (gut geführte, aerobe Grünschnittverrottung produziert nur geringe Mengen Klimagase; beim Nass-Bioabfall wäre die Gefahr größer).

Tab. 4 Abgasemissionen für Kohlenmonoxid (CO), Stickoxid (NO<sub>x</sub>), und Feinstaub (PM, particle matter) aus verschiedenen Abbränden von holziger Biomasse im Vergleich (je cbm Abluft); CO<sub>2</sub>-Freisetzung Gesamtmenge

Art der Feuerung	Leistung [kW]	CO [g/cbm]	<b>NO</b> x [g/cbm]	<b>PM</b> [g/cbm]	CO₂ [Freisetzung in kg aus 676 kg Biomasse]
Vegetationsfeuer (offene Verbrennung) Strauchvegetation	6 – 10 / m <sup>2</sup> hier auf Fläche bezogen	6,4 - 18	0,11 – 3,13	1,19 – 12,0	973 kg
Verkohlung per Carbo-Mob Rauchgasreinigung über thermische Nachverbrennung (Werte für Holzhackschnitzel, 100 kg/ha)	240*	< 0,1 -(3)	< 0,35	(0,1 – 0,5)	486 kg
Hackschnitzelfeuerung Rauchgasreinigung über Zyklon	160	0,09 - 1	0,23 - 0,29	0,1	973 kg

Ausschnitt aus Tab. 6 Ref. 4, s. Erläuterungen dort; CO ist kein "Klimagas", wirkt aber toxisch bei direkter Einatmung; \*ein Teil der Biomasse wird in Form von Biokohle stabilisiert, sodass für kW-Leistung nur der verbrannte Anteil angegeben ist

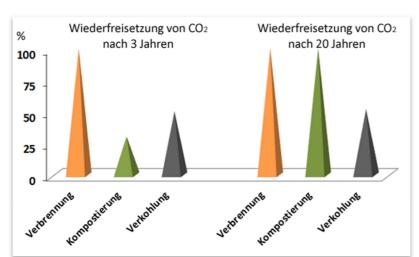
Laut Zahlen des UBA (2013) werden jährlich 40.000 t Schnittgut aus Land- und Forstwirtschaft sowie Garten offen verbrannt (Ref. 16). Die Umweltkosten sind dementsprechend hoch. Durch den Einsatz von Verkohlung wären nach 5 Jahren allein auf obiger Beispielfläche (4 cbm) Umweltschäden aufgrund von Emissionen im Wert von über 1.000 € vermieden worden.

Da CO<sub>2</sub> bei den Verwertungswegen in unterschiedlichem Maß wieder freigesetzt wird, verbessert sich die Ökobilanz für Biokohle in Wirklichkeit noch mehr (nur bei Bodenanwendung).

Betrachtet man die Wiederfreisetzung von CO<sub>2</sub> bis drei Jahre bzw. 20 Jahre nach dem Pflegeeinsatz, kommt man bei Halbwertszeiten von 1 Tag (vollständige Verbrennung), 10 Jahren (geschätzt für Kompost) und 500 Jahren (geschätzt für Biokohle als Bodensubstrat) zu **Abb. 23**.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Die Energiegewinnung aus Biomasse ist interessanterweise mit ähnlich hohen Umweltkosten verbunden wie bei Erdgas (aus Öl wären sie fast doppelt so hoch), (Quelle UBA und BMU 2012 Ref. 14, 15)





**Abb. 23:** Vergleich der Wiederfreisetzung von Kohlendioxid

Auf Grundlage einer mittleren Schätzung von 90 € pro t CO<sub>2</sub> (UBA 2012, Ref. 14) wären nach dreijähriger Anwendung von Biokohle theoretisch 44 € vermiedener Umweltschaden hinzuzurechnen, praktisch wäre der Wert durch die stärkere Abbaurate in der Anfangsphase der Anwendung etwas geringer. Bei der Kompostierung wären es 27 € in drei Jahren. Während jedoch der Umweltbonus bei Biokohle nach 20 Jahren fast unverändert hoch bliebe (42 €), wäre er bei Kompost vollständig aufgebraucht.

Rechnet man den Umweltbonus aus stark verlangsamter CO<sub>2</sub>-Freisetzung zu den vermiedenen Umweltkosten aus Tabelle 3, ergibt sich für die jährliche Vor-Ort-Verkohlung von 4 cbm nach 20 Jahren ein *vermiedener Umweltschaden von über 6.000* €. Nicht betrachtet sind hierbei mögliche Veränderungen von Emissionen aus Boden nach Anwendung von Biokohle. Hierüber herrscht noch große Unklarheit, da für klimawirksame Gase wie N<sub>2</sub>O zwar oft verringerte Emissionen beobachtet wurden, aber andere Indizien und Modellrechnungen auch für erhöhte Werte sprechen könnten (pers. comm. S. Laure, KIT-DFIU).

#### Mobile Verkohlung mit hohem Umweltnutzen gegenüber der offenen Verbrennung

Auch wenn die Entsorgung mit Feuer gemeinhin als kostenlos gilt, sind die Kosten aufgrund der Freisetzung von Klimagasen hier besonders hoch. Im Gelände kommen witterungsbedingt oft ungünstige Bedingungen für die Verbrennung hinzu, sodass die Rauchgaswerte noch schlechter sind.

Die Frage, warum (wie in vielen anderen Naturschutzstandorten) nach vielen Pflegejahren weder die Energieerzeugung noch die Kompostierung als alternative Verwertungswege beschritten wurden, wird aufgrund der Einschätzungen in Tabelle 3 plausibel. Die Erlösmöglichkeiten bei der Schnittgutabgabe am jeweiligen Werk sind einfach zu gering, als dass sich das Aufladen und der Abtransport lohnten. Auch wenn das Biomasse-Heizwerk das ungehäckselte Rohmaterial (dazu in geringen Mengen) überhaupt annähme, erlauben die Gewinnmargen im weiteren Verwertungsweg Energie oder Kompost nur geringe Abnahmepreise. Am Recyclinghof oder Kompostwerk führt dies sogar zu Abgabekosten (meist ab 2 cbm Schnittgut).

So bleibt als beste Alternative die mobile Verkohlung. Tragen die Erlöse für Naturschutzkohle den Aufwand, können gleichzeitig klimawirksame Verbindungen stark reduziert werden.



# Weitere Verbesserungsmöglichkeiten der Wirtschaftlichkeit mobiler Verkohlung

Für die Wirtschaftlichkeit wäre es sicher von Vorteil, die Zerkleinerung selbst zu übernehmen und zeitlich mit der Verkohlung zu verschränken (s. Rotationszyklus Vortrocknung). Für 4 cbm wäre dies schätzungsweise eine Kostenersparnis von ca. 50 €, d. h. für die Vor-Ort-Arbeiten eine Einsparung von 13 %. Das Rohmaterial müsste hierfür jedoch gut vorgetrocknet sein.

Für Schnittgut wie die erprobten Weichholztriebe mit nur 0,5 bis 2 cm im Durchmesser wären auch besonders kostensparende Zerkleinerungsgeräte denkbar. Der Umstand, dass die Verkohlungsanlage bis 15 cm Stücklängen toleriert, könnte zu Ersparnissen beim Hackaufwand führen. Aufgrund fehlender Systeme ist dies derzeit jedoch nur theoretisch. Die im Handel erhältlichen Hacker für die Größenordnung "Strauchschnitt" sind auf Einstreu oder Kompostierung eingestellt und häckseln relativ klein. Die Suche nach einer geeigneten Zerstückelungstechnik geht daher weiter.

Auch eine noch höhere Anlagenkapazität würde die Situation verbessern, ohne dass sich die Investitionskosten merklich erhöhten. Für die Größe der Schnittgutmengen sind jedoch Grenzen des Handhabbaren gesetzt und mechanisierte Hilfsgeräte wie Greifer bedeuteten wiederum Anschaffungen.

Der Faktor Restfeuchte ist für den Verkohlungserfolg und die Wirtschaftlichkeit eine sehr wichtige Größe. Die natürliche Trocknung mit einfachen Trockengestellen hatte sich als sehr effektives Mittel erwiesen, das auch auf andere Flächen übertragen werden kann.

#### Biokohle-Markt je nach Qualität und Verwendungsziel der Kohlen

Eine Nachfrage für "Biotop-Kohle" vonseiten der Landwirtschaft mit Ackerfrüchten wäre aus Kosten- bzw. Mengengründen auszuschließen, da hier knappe Deckungsbeiträge eine Rolle spielen. Denkbar ist jedoch die private und gartenbauliche Verwendung der Kohlen zur Bodenverbesserung. Wie sich lokal zeigt, werden hohe Biokohle-Preise bei entsprechender Umweltrelevanz akzeptiert. Auch Angebote aus dem Ausland liegen bei 2,5 €/kg (unter 50 l ohne Versandkosten).

Als Anreiz für den Umweltschutz erzielt der Käufer beim Kauf eines Kilogramms *Biotop-Kohle* einen Umweltnutzen im Wert von über 1,50 €. Die Frage wäre, ob die Nachfrage für "Naturschutzkohle aus der Region" mengenmäßig ausreicht, um regionale Kleinanlagen zu finanzieren. Auch die Nutzung der Kohle in der Energiegewinnung könnte in einigen Fällen ein Ansatz sein. Oft wird von Heizwerken ein höherer Heizwert bei Holzbriketts erwartet, sodass eine prozentuale Zumischung energiereicherer Kohle getestet wird (www.carola-holweg.de/aktuelle-projekte). Auch auf diesem Markt herrschen höhere Preise als man allein aufgrund des Energiegehalts der Pyro-Kohlen (z. B. 29 MJ/kg) gegenüber Steinkohle (ca. 29–30 MJ/kg mit ca. 250 €/t) vermuten würde.

Während die Qualität verkohlter Weichholztriebe (s. Pyro-Ruten) eine gute Verwendbarkeit belegt (z.B. hoher Kohlenstoff- und Energiegehalt), ist dies bei Schilf anders. Die geringere Dichte des Ausgangsmaterials bedingen höhere Zeitkosten für die Verarbeitung. Die Möglichkeiten einer Wirtschaftlichkeit sind hier enger. Interessant wäre allerdings, wenn sich hinter der deutlich höheren Düngewirkung von Pyro-Schilf eine Wirkungskomponente verbirgt, die für die Gesamtnährstoffversorgung von Pflanzen auch längerfristig positiv ist. Auch hier gibt es weiteren Forschungsbedarf.



Für Schilfgras-Standorte scheint die Grünverwendung mit Ballenpressung, Silierung und nachfolgender Biogas-Produktion (wie bei Pfullendorf-Denkingen seit einiger Zeit umgesetzt) ein sinnvoller Weg zu sein. Jedoch ist dies schon aufgrund zu weiter Entfernungen nicht immer möglich, sodass die Vorteile einer mobilen Verkohlung an manchen Standorten doch mehr ins Blickfeld rücken können. Die Sachlage könnte sich auch dadurch ändern, dass sich mit der Kohle aufgrund besonderer Eigenschaften spezielle Verwendungen verknüpfen. Wie die Vergangenheit zeigt, wurden immer wieder überraschende Verwendungen für Holzkohlen (wieder)-entdeckt.

# Machbarkeit von Verkohlung bei Naturschutzflächen

Die Verkohlung von Material der ausgewählten Naturschutzflächen über HTC scheint aus mehreren Gründen wenig zielführend zu sein. Der mobile Maßstab ist bei HTC-Technik grundsätzlich nicht möglich. Ähnlich zu Biogasanlagen müsste das Material zu einer Anlage geliefert werden. Das Haupttätigkeitsfeld einiger HTC-Entwicklungen hat sich seit einiger Zeit zudem auf die Klärschlammverarbeitung konzentriert, da hier die Finanzierung der teuren Anlagentechnik durch die Annahme des Klärschlamms möglich ist. Wie der Versuch gezeigt hat, wären auch noch technische Entwicklungen für eine leichtere Verwendbarkeit des getesteten Schilfröhrichts nötig, dies trotz des schon hohen Zerkleinerungsgrades. Auch ist die im Vergleich zu Pyro-Kohle geringere Langlebigkeit von HTC-Kohle zu nennen. Das Vorhandensein zusätzlicher organischer Verbindungen könnte zudem speziellere Vorbehandlungen nötig machen.

Ein sinnvoller Einsatz von HTC für kleinflächig verteilte Naturschutzflächen wie NSG Kreuzäcker wird derzeit also nicht gesehen. Anders könnte die Situation bei sehr ausgedehnten Schilfflächen sein.

#### 8. Rechtliche Rahmenbedingungen

Wie schon in einer vorhergehenden Studie näher dargelegt (Ref. 4), wäre beim Einsatz technischer Anlagen für die Verwertung von Schnittgut an einige rechtliche Rahmenbedingungen zu denken. Kleine mobile Verkohlungsanlagen mit empfindlicher Rauchgasreinigung so auszustatten, dass die Einhaltung der zukünftig noch engeren Grenzwerte in der Kategorisierung "Abfallbehandlungsanlage" nach TA-Luft garantiert ist, wäre wirtschaftlich nicht durchführbar. Der Einsatz solcher Anlagen könnte jedoch bis zu 80 – 90 % der Rauchgase gegenüber dem offenen Brennen einsparen. So stand die mobile Anlage im Versuchsbetrieb oft im eindrucksvollen Kontrast zu benachbarten Rauchsäulen aus der Böschungspflege.

Die Verkohlung ist auch aus anderen Gründen vertretbar. Da das Material normalerweise auf der Fläche verbleibt und weder für die Kompostierung noch zur Energieerzeugung dient, könnte die Verkohlung eine Alternative sein ohne Konkurrenz zu bestehenden Stoffflüssen. Von Depositionen im Umkreis des Einsatzortes ist nicht auszugehen. Die Bedienung der Anlage ist einfach und nicht riskant für Verletzungen. Die angebrachten Schutzeinrichtungen erfüllen den Schutzzweck.

In diesem Sinn wäre die Verwertung von Schnittgut durch mobile Verkohlung keine Abfall-Entsorgung, sondern eher als Umwandlung von Schnittgut als Wertstoff in eine andere Kohlenstoffform mit stabilen Eigenschaften zu bezeichnen. In Anbetracht von Pflanzenkohle als zunehmend gefragtes Hilfsmittel für gartenbaulich-landwirtschaftliche Zwecke, als Güllezusatz (Ref. 17, 18) oder in der Tierhygiene (Ref. 3) und auch als in anderen Bereichen interessanter Stoff (z.B.



Bodensanierung) muss eher von einer ressourcenschonenden Produktion eines vielseitig einsetzbaren Hilfsstoffs zur stofflichen Nutzung gesprochen werden (vgl. Ref. 19).

Die Verwendung von Zusatzstoffen zur Bodenverbesserungen ist rechtlich nach der deutschen Düngemittelverordnung (DüMV) zu beurteilen (Ref. 20). Nach den dortigen Bestimmungen sind Holzkohlen "verkehrsfähig 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 Bodenhilfstoffe vor. Bemühungen um eine internationale Übereinkunft akzeptabler Quellen und Qualitäten von Biokohle lassen sich in Standardisierungs-Leitlinien der IBI (Ref. 21) und im europäischen Zertifizierungsprojekt ECB finden (Ref. 22).

Anderweitige Verwendungen von Pflanzenkohlen aus der Carbo-Mob-Anlage wie etwa als Brennstoff oder Zusatz zu Holzbrennstoffen (Presslinge, Briketts usw.) wären in Bezug auf die Bewertung der Umweltverträglichkeit ohne Einschränkung möglich.

# 9. Zusammenfassung

Es bestand die Frage, ob sich die Situation fehlender Verwendungsmöglichkeiten für Schnittgut aus Naturschutzflächen durch das neue Angebot von Verkohlungstechniken verbessern könnte. Für Schilfrohr wurden eine HTC-Technik und eine mobile Pyrolyseanlage eingesetzt, während Weichholztriebschnitt mit einem mobilen System verkohlt wurde, das auf der BiGchar-Pyrolysetechnik beruht. Die Ergebnisse für die typisch kleinen Mengenaufkommen pro Fläche und Jahr gelten auch für andere Bereiche wie z.B. Streuobstwiesen und sind folgendermaßen zusammenzufassen:

- Die Schnittgutvorbereitung ist sehr wichtig und verlangte je nach Anlagentechnik einen sehr unterschiedlichen Aufwand. Während bei der gewählten HTC-Anlage starkes Kleinhäckseln nötig ist, können in der mobilen Verkohlungsanlage Carbo-Mob (BiGchar-Technik) bis zu 15 cm lange Triebe verarbeitet werden. Die Frage tauchte auf, ob aufgrund des verringerten Häckselaufwands Einsparungen für die mobile Verkohlung möglich wären. Für die mobile Verkohlung ist jedoch ein hoher Trockengrad Voraussetzung. Einfache Trockengestelle wären ein großer Fortschritt für die natürliche Trocknung vor Ort.
- Wenn bei der Verwendung der Kohlen die Verbrennung gefragt ist, führt Schilfrohr aufgrund hoher Aschegehalte in beiden Verkohlungswegen zu ungünstigen Eigenschaften. Pyro-Kohle aus dem holzigeren Material hat dagegen geringe Ascheanteile und einen hohen Brennwert.
- **Grenzwerte** für Schwermetalle, AOX, PCB, PAK und Dioxin wurden in keiner der drei Kohlen überschritten (n. Bioabfall-Ordnung). In kurzzeitigen **Biotests** zur Verträglichkeit bei Pflanze und Regenwürmern wurden außer für die HTC-Kohle keine negativen Reaktionen gefunden.
- HTC-Anlagen sind in jedem Fall zentraler einzusetzen und vom Standort her für Gewerbe- oder Industriegebiete prädestiniert. Der Vorteil, dass hier auch feuchte Biomassen verwertet werden können, würde für Kleinstandorte des Naturschutzes eher nicht in Frage kommen. Schilf und



Halmgutartiges aus Kleinstandorten kann dagegen immer häufiger für Biogas verwendet werden, da die Erreichbarkeit durch vermehrten Anlagenbau besser wird.

- Würde mobile Verkohlung die Entsorgungspraxis offener Verbrennung auf Naturschutzflächen ersetzen, könnten Klimagase wie CH<sub>4</sub>, NO<sub>x</sub> und Feinstaub eingespart und 80 90 % der Umweltschäden aufgrund von Emissionen abgewendet werden. In der mittelfristigen Betrachtung könnten auf der Beispielfläche mit jährlich 4 cbm Schnittgut Umweltkosten in Höhe von 6.000 € in insgesamt 20 Jahren eingespart werden.
- Die Möglichkeit der Vortrocknung von Schnittgut durch Abwärme ist eine zusätzliche ökologische Verbesserung. Zudem sind keine Stützenergie und nur wenig Betriebsenergie nötig.
- Bei der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit anderer Verwertungen (Energiegewinnung, Kompostierung) wurde deutlich, warum diese Wege auf Kleinstandorten meist ausbleiben: der Aufwand für Abholung und Abtransport läßt sich nicht mit dem Erlös aus dem Schnittgutverkauf kompensieren.
- Auch die Verkohlung wäre nur bei hohen Verkaufserlösen der Pflanzenkohle realisierbar. Der Verkaufsweg von Naturschutzkohle als Energiekohle unter Preisanpassung an Steinkohle scheidet daher aus. Denkbar wären aber Verwendungen als Bodensubstrate und der Verkauf in kleinen Mengen an Hobbygärtner, wenn für die ökologische Sonderleistung "Biokohle aus regionalem Naturschutz" ein Aufpreis akzeptiert würde.
- Wo in der Vergangenheit Wege der Energiegewinnung oder Kompostierung aus wirtschaftlichen Gründen ausblieben, könnte die mobile Verkohlung unter der Bedingung hochpreisiger Vermarktungsmöglichkeiten eine Option sein. Die Prämisse, dass keine Verdrängung bisherig funktionierender Entsorgungswege stattfindet, wäre gleichzeitig erfüllt.

### **Ausblick**

Die Studie zeigte, dass mobile Verkohlung unter Umständen ein nachhaltiges Entsorgungssystem für Naturschutzflächen sein könnte, zumindest für Standorte mit geringeren Schnittgutmengen. Die folgenden Fragen laden ein zum weiteren Austausch mit den betreffenden Interessengruppen:

- 1. Sind Bedingungen vorhanden beziehungsweise können diese geschaffen werden, um den Betrieb einer mobilen Verkohlungsanlage im Landkreis zu ermöglichen?
- 2. Wären Naturschutzflächen, die für die Vor-Ort-Verkohlung geeignet wären, in einer solchen Zahl vorhanden, dass sich die Investition und der Betrieb eines Carbo-Mob im regionalen Bezugsrahmen lohnten?
- 3. Wären genügend Interessenten für "Naturschutzkohle" in der Region vorhanden, sodass sich genügend Absatz für die Kohlen findet?
- 4. Könnte die besondere Umweltleistung der Verkohlung durch die Vermeidung von Klimagasen in der Region mit Mechanismen freiwilliger Abgaben verbunden werden (Biotop-Aufschlag auf Biokohlepreis, regionale CO<sub>2</sub>-Kompensations-Verträge)?



#### Literaturliste

- Ref. 1 <u>Pieplow, Scheub, Schmidt</u> (2013) Terra Preta. Die schwarze Revolution aus dem Regenwald Oekom Verlag. <u>Stiftungsgemeinschaft anstiftung & ertomis</u> (Hrsg.)
- Ref. 2 Kawa and Oyuela-Caycedo (2008) Amazonian Dark Earth: A Model of Sustainable Agriculture of the Past and Future?
  <a href="http://www.academia.edu/900122/Amazonian">http://www.academia.edu/900122/Amazonian</a> Dark Earth A Model of Sustainable Agriculture
  re of the Past and Future
- Ref. 3 Gerlach, A. (2012) Bericht über Pflanzenkohle für die Tiergesundheit (<u>www.ansev.de/News/96/73</u> Symposium des ANS eV.htm%29)
- Ref. 4 Holweg C. (2014) Carbo-Mob: mobile Verkohlung für Restschnittgut aus Landschaftspflege,
  Wein- und Obstbau (6 MB)
  <a href="https://www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche 1/stab 1/inn">https://www.badenova.de/mediapool/media/dokumente/unternehmensbereiche 1/stab 1/inn</a>
  ovationsfonds/abschlussberichte/2011 10/2011-12 AB mobile Verkohlung.pdf
- Ref. 5 www.blackisgreen.net
- Ref. 6 <u>www.ava-co2.com</u>
- Ref. 7 NSG Kreuzäcker:

  <a href="http://pfullendorf.bund.net/themen\_und\_projekte/naturschutz/naturschutzgebiet\_kreuzaecker\_denkingen/">http://pfullendorf.bund.net/themen\_und\_projekte/naturschutz/naturschutzgebiet\_kreuzaecker\_denkingen/</a>
- Ref. 8 NSG Humbrühl-Rohrmatten: <u>http://www.nabu-freiburg.de/projekte/schutzgebiete/humbr%C3%BChl/</u>
- Ref. 9 <a href="http://www.badische-zeitung.de/freiburg-tuniberg/hilfe-fuer-das-schwarzkehlchen-65336819.html">http://www.badische-zeitung.de/freiburg-tuniberg/hilfe-fuer-das-schwarzkehlchen-65336819.html</a>
- Ref. 10 "Methodenbuch zur Analyse organischer Düngemittel, Bodenverbesserungsmittel und Substrate", 1998, grundlegend überarbeitet als Lose-Blatt-Sammlung, fünfte Auflage 2006, Hrsg. Bundesgütegemeinschaft Kompost (BGK)
- Ref. 11 BARGMANN, M. C. RILLIG, W. BUSS, A. KRUSE, M. KUECKE (2013) Hydrochar and Biochar Effects on Germination of Spring Barley. Blackwell Verlag GmbH, Bd. 199, pp. 360-373
- Ref. 12 Hendricks A. (2012) http://www.hs-owl.de/fb8/fachgebiete/abfallwirtschaft/pdf/Poster\_HTC-Landnutzung.pdf
- Ref. 13 Holweg, C. (2012) Beobachtungen zur Wirkung von Pflanzenkohlen auf die Bodenbiologie auf Basis der Regenwurmaktivität in Feldversuch und in vitro (<a href="http://eprints.dbges.de/851/">http://eprints.dbges.de/851/</a>)
- Ref. 14 Breitschopf, B. (2012): Ermittlung vermiedener Umweltschäden Hintergrundpapier zur Methodik im Rahmen des Projektes "Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien", im Auftrag des BMU, <a href="http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hg">http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/hg</a> umweltschaeden bf.pdf



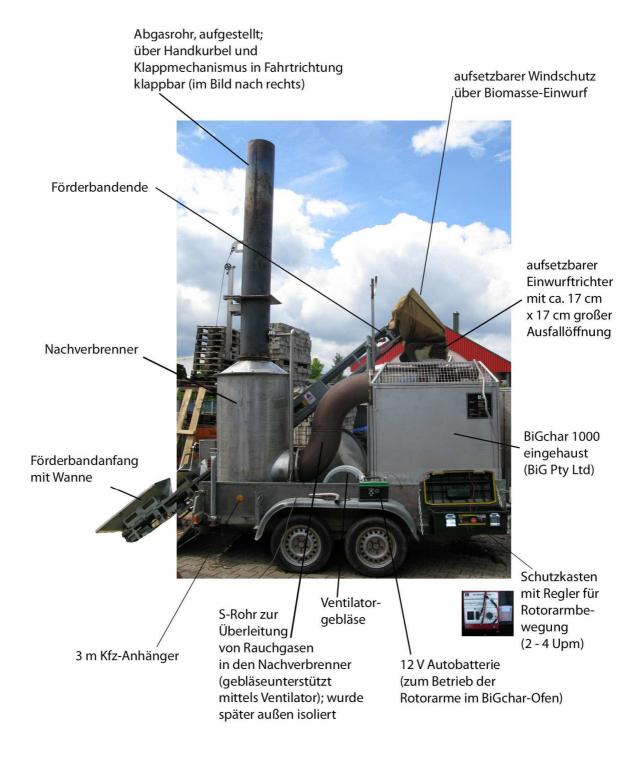
- Ref. 15 BMU (2012): Erneuerbare Energien 2011, <a href="http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee">http://www.erneuerbare-energien.de/files/pdfs/allgemein/application/pdf/ee</a> in zahlen 2011 bf.pdf
- Ref. 16 Jörß, W. (2013) Emissionen aus offener Verbrennung, Teilbericht zum F&E-Vorhaben "Strategien zur Verminderung der Feinstaubbelastung PAREST", W. Jörß, ITZ, UBA Texte 42
- Ref. 17 Utz, S. (2011) Gülle: Damit es nicht mehr zum Himmel stinkt. Augsburger Allgemeine, Landwirtschaft
- Ref. 18 Schmidt, H.-P. (2011) Güllebehandlung durch Pflanzenkohle. Ithaka Journal 1: 94–97
- Ref. 19 Kreislaufwirtschaftsgesetz (2012): http://dejure.org/gesetze/KrWG/8.html
- Ref. 20 DüMV Düngemittelverordnung (2008): <a href="www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d">www.gesetze-im-internet.de/bundesrecht/d</a> mv 2008/gesamt.pdf)
- Ref. 21 www.biochar-international.org
- Ref. 22 Biochar Science Network (Vers. 2.3): Richtlinien für den Einsatz von Biokohle im biologischen Anbau, www.ithaka-journal.net/druckversionen/biokohle richtlinien v2.pdf

### **Danksagung**

Die Studie wäre nicht möglich gewesen ohne die Verantwortlichen für Pflegeflächen und Verkohlungsanlagen. Werner Oberle brachte sich im NSG Humbrühl-Rohrmatten nicht nur als engagierter Naturbeobachter, sondern auch in praktische Lösungen für Trockengestelle ein. Für den Kontakt zu ihm danke
ich Sigi Mattausch. Norbert Meier danke ich sehr für den Hackereinsatz und Hermann Hofmann für die
Mithilfe bei der Erprobung von Schilf im NSG Kreuzäcker bei Denkingen. Der Firma AVA-CO2 vielen Dank
für die probeweise Verkohlung von Schilf und die Analyse der HTC-Kohle. Die mobile Anlage Carbo-Mob
stammte aus einem Vorprojekt von mir selbst. Dr. Bernd-Jürgen Seitz sei für das stetige Interesse an den
Entwicklungen gedankt. Für das Interesse und die finanzielle Unterstützung dieser Studie besonderen
Dank an den LNV e.V., insbesondere Dr. Gerhard Bronner und Christine Lorenz-Gräser.

Carola Holweg, 1. August 2014





### Bildtafel 1: Mobile Verkohlungsanlage Carbo-Mob (Projektstand des Fotos: Herbst 2013)

Die Anlage ging aus einem Projekt hervor, dass mit Unterstützung des badenova Innovationsfonds in der Region Freiburg zwischen 2011 und 2014 durchgeführt wurde. Ziel des Projekts war eine flexible, mobile Kleinanlage mit den Komponenten Verkohlung, Biomasseförderung, Rauchgasbehandlung, Näheres im umfangreichen Abschlussbericht (Ref. 4)





Bildtafel 2: HTC-Anlage von AVA-CO2 (Standort Rheinhafen Karlsruhe, 2011), Ref. 6