



Schlussbericht vom 28. Dezember 2022 - Zusammenfassung

PYROCHAR

Erweiterung von Biomasse-Substraten für zusätzliche Energie- und Pflanzenkohleproduktion



Quelle: © FHNW 2022



Fachhochschule
Nordwestschweiz

Datum: 28. Dezember 2022

Ort: Basel und Windisch

Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Subventionsempfänger/innen:

Kaskad-E GmbH
Dornacherstrasse 192, CH-4053 Basel
www.kaskad-e.ch

FHNW, Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
Klosterzelgstrasse 2, CH-5210 Windisch
www.fhnw.ch

Bioburn AG
Luzernstrasse 55, CH-6144 Zell
www.bioburn.ch

Autoren:

Stephan Gutzwiller, Kaskad-E GmbH, s.gutzwiller@kaskad-e.ch
Timothy Griffin, Alexander Garcia, Léonard Marchand, Dieter Winkler
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz FHNW, timothy.griffin@fhnw.ch

BFE-Projektbegleitung:

Sandra Hermle, sandra.hermle@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/501990-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Ausgangslage und Motivation

Die Pyrolysetechnik zur Herstellung von Pflanzenkohle ist inzwischen ausgereift und im Übergang zur Serienproduktion. Für die Schweiz ist Pflanzenkohle seit Juni 2016 in der Düngemittelverordnung als Bodenzuschlagsstoff zugelassen. Seit 1. Januar 2018 gilt diese Zulassung auch für den Biolandbau. Seither steigt die Nachfrage nach Pflanzenkohle stark. Als Ausgangsmaterial ist bis heute (2022) aber nur naturbelassenes Holz erlaubt.

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden weitere (nicht-holzige, aschereiche) Substrate fundiert untersucht, die sich mittels Pyrolyse schadstoffarm und wirtschaftlich in Wärmeenergie und Pflanzenkohle umwandeln lassen könnten. Diese Substrate werden heute meist nicht oder nur mit sehr grossem Aufwand energetisch genutzt, sondern häufig entsorgt, kompostiert oder stofflich als Dünger oder Futtermittel verwertet. Durch die Verkohlung hingegen könnte ihr energetisches Potenzial zu ca. 50% genutzt und mit der **Pflanzenkohle** im Boden CO₂ langfristig gespeichert, die Wasser- und Nährstoffspeicherung verbessert und die Mineralien in pflanzenverfügbarer Form in den Boden zurückgeführt werden.

Arbeitspaket 1: Bewertung des Biomassepotenzials für die Pyrolyse

Die in (Keel 2016) aufgeführten möglichen «neuen» Biomassen für eine zusätzliche energetische Nutzung werden hinsichtlich der spezifischen Anforderungen für die Pyrolyse gefiltert und deren Mengenpotenzial bestimmt.

In einem ersten Schritt (**Grobselektion**) werden folgende Ausschlusskriterien - nach absteigender Priorität geordnet - angewendet (in Klammern wird jeweils das Ziel für den Ausschluss erläutert):

- I. Substrat wird mit dem ausschliesslichen Zweck zur Pflanzenkohleproduktion angebaut (keine zusätzliche Bodennutzungskonkurrenz, kein Nachwachsender Rohstoff (NaWaRo))
- II. Substrat wird heute massgeblich bereits ökologisch und ökonomisch sinnvoll als Futtermittel genutzt (keine Nahrungskonkurrenz)
- III. Substrat enthält signifikante Mengen an Nährstoffen insb. Stickstoffverbindungen, die bei einer thermischen Behandlung zerstört werden (keine Nährstoffvernichtung und Stickoxid-Emissionen)
- IV. Substrat ist herkunftsbedingt mit pyrolytisch nicht zersetzbaren Fremdstoffen belastet (keinen Fremdstoffeintrag in die Böden)
- V. Substrat wird heute massgeblich bereits ökologisch und ökonomisch sinnvoll als Energieträger genutzt (keine Energiekonkurrenz). Das Differenzpotenzial des heute genutzten Potenzials zum nachhaltig nutzbaren Potenzial ist von diesem Ausschlusskriterium nicht betroffen
- VI. Substrat ist herkunftsbedingt sehr feucht resp. schlecht trockenbar (keinen unverhältnismässigen Trocknungsaufwand)

In einem zweiten Schritt werden die Substrate auf die Erfüllung folgender Kriterien hin untersucht (**Feinselektion**):

- Massen-, Energiepotenziale und Verfügbarkeiten in der Schweiz
- Substrateigenschaften physikalisch (ohne Aufbereitung)



- Substrateigenschaften chemisch
- Aufwand Aufbereitung und Pyrolyse
- Voraussichtliche Pflanzenkohlequalität
- Voraussichtliche Abgasemissionen

Von den 32 untersuchten Substraten passierten 18 Substrate die Grobselektion und schliesslich sechs Substrate die Feinselektion:

- Pferdemist-Einstreu (im Folgenden *Pferdemist* genannt)
- Müllereiabfälle
- Abfälle Kaffeerösterei (im Folgenden *Kaffeeabfälle* genannt)
- Waldholz, nur Rinde (im Folgenden *Rinde* genannt)
- Holz-Separierung Vergärung (im Folgenden *Holz-Vergärung* genannt)
- Holz-Separierung Kompostierung (im Folgenden *Holz-Kompostierung* genannt)

Die Energie- und Pflanzenkohlepotenziale dieser sechs Substrate werden in Abbildung 1 illustriert.

Die Selektion zeigt, dass sich jene Substrate für die Verkohlung am besten eignen, die dem Holz am verwandtesten sind. Hochinteressant wäre die Verkohlung von Baumrinde. Einerseits weil sie fast die Hälfte des zusätzlichen Energiepotenzials und der Pflanzenkohleproduktion ausmachen könnte. Andererseits weil sie bezüglich heiklen Inhaltsstoffen wie Schwefel und Chlor unkritisch ist.

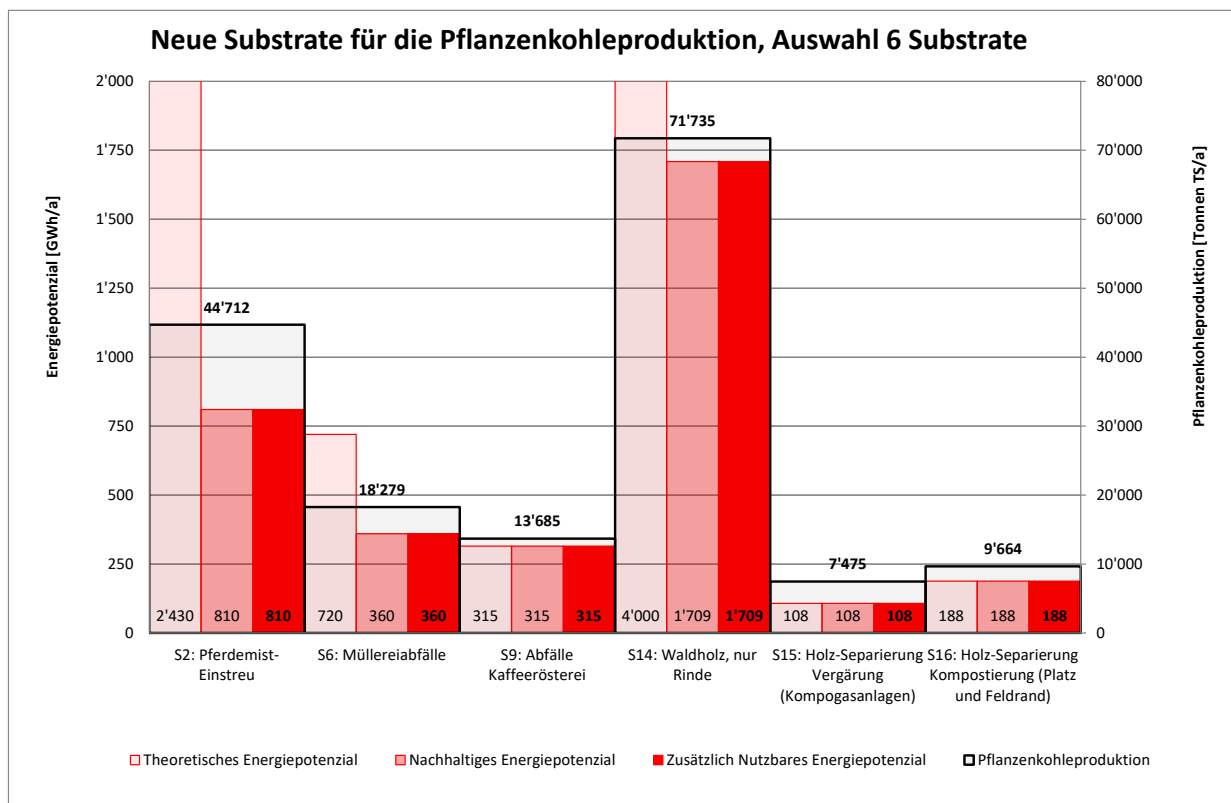


Abbildung 1: Energie- und Pflanzenkohlepotenziale der sechs untersuchten Substrate nach der Feinselektion. Der schwarz umrandete Balken «Pflanzenkohleproduktion» würde erzielt, wenn das gesamte Substrat des zusätzlich nutzbaren Energiepotenzial zu Pflanzenkohle umgewandelt würde (23% bzgl. dem TS-Massengehalt, Erfahrungswerte Kaskad-E). Dabei würde ca. 50% des zusätzlichen Energiepotenzials der Pflanzenkohle «verschenkt».

Arbeitspaket 2 und 3: Vorbehandlung der Substrate und Pyrolyseversuche auf einer Laboranlage

Die Laborversuche fanden alle auf der eigens zu diesem Zwecke aufgebauten Laboranlage PyroTube statt. Diese kontinuierliche Pyrolyseanlage an der FHNW hat eine variable thermische Leistung zwischen 3.5 kW und 8 kW, je nach Art und Menge des pyrolysierten Brennstoffs.

Für die Laborpyrolyse müssen alle Substrate getrocknet und anschliessend (ausser Holzhackschnitzel und Holz-Separierung Kompostierung) pelletiert werden, da sich ansonsten Probleme bei der Förderung in und durch die Anlage ergeben (Verstopfungen, unregelmässiger Substratdurchsatz). Holzhackschnitzel und Holz-Separierung Kompostierung wurden lediglich zusätzlich zerkleinert.



Tabelle 1: Übersicht der durchgeführten Versuche. Holzhackschnitzel werden als Referenz und Weizenkleie als Hauptanteil der Müllereiabfälle (für alle weiteren Versuche anstelle von Gerstenabgang) zusätzlich gemessen. Bei Pferdemist und Holz-Vergärung wird zusätzlich Dioxin (PCDD/F-Messung) gemessen.

Versuch	Datum	Substrat	Pyrolyse	
			Temperatur (Durchschnitt)	Verweilzeit
			°C	min
1	18.02.2020	Pferdemist	656	28
2	22.05.2020	Holzhackschnitzel	735	28
3	23.06.2020	Kaffeeabfälle	739	28
4	21.09.2020	Müllereiabfälle (Gerstenabgang)	715	28
5	30.10.2020	Holz-Kompostierung	762	17
6	01.12.2020	Rinde	702	28
7	10.12.2020	Holz-Vergärung	713	28
8	15.12.2020	Pferdemist (PCDD/F-Messung)	770	28
9	10.03.2021	Holz-Vergärung (PCDD/F-Messung)	765	28
10	07.05.2021	Müllereiabfälle (Weizenkleie)	721	28

Ergebnisse Substratanalysen

Tabelle 2: Eigenschaften der untersuchten Substrate (weitere Eigenschaften s. Anhang 11.3).

Substrat	Aschegehalt	Wassergehalt	Schüttdichte	Heizwert trocken	Energie-Dichte	C	H	N	S
	Ma.-% _{wf}	Ma.-%	kg/m ³	MJ/kg _{wf}	MJ/m ³	Ma.-% _{wf}			
Holzhackschnitzel	1.3	7.8	209	18.4	3'845	52.5	6.7	0.07	0.01
Pferdemist	7.9	10.2	376	18.3	6'881	49.5	4.6	2.5	0.15
Gerstenabgang	2.8	22.1	479	17.4	8'335	48.6	4.5	1.96	0.18
Weizenkleie	7.2	9.9	365	17.5	6'388	47.4	4.8	2.8	0.2
Kaffeeabfälle	7.6	6.5	752	17.8	13'386	49.3	6.4	2.89	0.23
Rinde	2.5	15.8	592	18.7	11'070	49.7	4.6	0.4	0.01
Holz-Vergärung	19.8	8.6	581	14.0	8'134	38.3	3.6	1.11	0.08
Holz-Kompostierung	17.9	12.2	252	17.7	4'460	42.3	3.9	1.07	0.15

wf: wasserfrei



Ergebnisse Abgasemissionen

Tabelle 3: Übersicht Ergebnisse Abgasemissionen (Messwerte und LRV-Grenzwerte gelten für einen Restsauerstoffgehalt von 13%).

Substrat	CO	SO ₂	CH ₄	NO ₂	PCDD/F (inkl. BG)
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	ng/Nm ³
Holzhackschnitzel	20	n.g.	< 1	86	n.g.
Pferdemist	1	185	3	355	n.g.
Pferdemist (PCDD/F-Messung)	7	n.g.	7	480	0.21
Gerstenabgang	3	n.g.	7	560	n.g.
Weizenkleie	< 1	291	11	824	n.g.
Kaffeeabfälle	< 1	n.g.	10	610	n.g.
Rinde	7	70	< 1	363	n.g.
Holz-Vergärung	< 1	170	5	504	n.g.
Holz-Vergärung (PCDD/F-Messung)	22	201	3	497	0.38
Holz-Kompostierung	50	88	< 1	326	n.g.

BG: Bestimmungsgrenze

n.g.: nicht gemessen oder gemessen, aber unbrauchbare Daten. Die SO₂-Emissionsmessungen sind generell mit Vorsicht zu geniessen und Grenzwertüberschreitungen werden nicht als hartes Ausschlusskriterium verwendet.

	Parameter erfüllt alle Grenzwerte
	Parameter ist <50% über dem Grenzwert gemäss Art. 71 od. 74 LRV
	Parameter ist 50%-400% über dem Grenzwert gemäss Art. 71 od. 74 LRV
	Parameter überschreitet den Grenzwert gemäss Art. 71 od. 74 LRV um >400%



Ergebnisse Pflanzenkohleeigenschaften

Tabelle 4: Übersicht Pflanzenkohleeigenschaften. Die Grenzwerte für alle EBC-Klassen finden sich im Anhang in Abschnitt 11.1 auf Seite 123, Erläuterungen zu den verwendeten Abkürzungen im Abkürzungsverzeichnis auf Seite 7.

Substrat	C _{tot}	H/C _{org}	As	Pb	Cd	Cu	Ni	Hg	Zn	Cr	Σ16 EPA PAK (exkl. BG)	Σ8 EFSA PAK (exkl. BG)	Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthen	Chrom-VI	PCDD/F+PCB (inkl. BG)	Σ6 DIN-PCB (inkl. BG)
	Ma.- %	mol/ mol	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	ng/ kg	μg/ kg
Holzhackschnitzel	89.5	0.18	< 0.8	< 2	< 0.2	6	4	<0.07	529	6	105	6.1	n.g.	< 0.5	n.g.	n.g.
Pferdemist	73.1	0.24	< 0.8	< 2	< 0.2	45	335	<0.07	259	722	6.7	n.b.	n.g.	< 0.5	1.3	1.16
Gerstenabgang	71.2	0.31	< 0.8	4	< 0.2	35	15	<0.07	134	28	0.7	n.b.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Weizenkleie	68.1	0.17	< 0.8	< 2	< 0.2	42	3	<0.07	313	< 1	3.7	n.b.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Kaffeeabfälle	66.6	0.15	< 0.8	< 2	< 0.2	241	6	<0.07	63	2	0.2	n.b.	n.g.	< 0.5	n.g.	n.g.
Rinde	81.9	0.21	< 0.8	3	< 0.2	14	6	<0.07	265	4	n.b.	n.b.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Holz-Vergärung	55.4	0.16	2.7	20	< 0.2	45	16	<0.07	183	52	n.b.	n.b.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Holz-Kompostierung	63.5	0.13	3.3	8	< 0.2	93	18	<0.07	102	32	1.1	n.b.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.

n.b.: nicht berechenbar, da alle Werte unter Bestimmungsgrenze (BG)

n.g.: nicht gemessen

	Parameter erfüllt den Grenzwert für alle EBC-Klassen
	Parameter erfüllt nicht den Grenzwert für EBC-Futter
	Parameter erfüllt nicht den Grenzwert für EBC-Futter/AgroBio
	Parameter erfüllt nicht den Grenzwert für EBC-Futter/AgroBio/Agro/Urban/Gebrauchsmaterial



Arbeitspaket 4: Pyrolyseversuche auf zwei kommerzielle Anlagen

Im Rahmen von Arbeitspaket 4 wurden drei der zuvor in der Laboranlage getesteten Substrate auf einer kommerziellen Pyrolyseanlage (Pyreg-Anlage in Basel) und einer Pilotanlage (PyroFarm-Anlage in Stettlen) getestet: (i) Rinde, (ii) Weizenkleie und (iii) Kaffeeabfälle. Dabei wurden die Abgase aus der Pyrolysegasverbrennung und die Zusammensetzung der Pflanzkohle gemessen.

Tabelle 5: Übersicht der durchgeführten Versuche

Versuch	Datum	Substrat	Anlage
1	14.09.2021	Rinde	Pyreg PX1500
2	17.09.2021	Weizenkleie	PyroFarm P40
3	22.09.2021	Kaffeeabfälle	PyroFarm P40
4	23.09.2021	Rinde	PyroFarm P40

Ergebnisse Abgasmessungen

Tabelle 6: Ergebnisse der Abgasmessungen von Rinde, Weizenkleie und Kaffeeabfälle, die in verschiedenen Anlagen gemessen wurden

			Rinde			Weizenkleie		Kaffeabfälle	
Parameter		Einheit	PyroTube	Pyreg	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm
O ₂		Vol.-%	2.2	3.9	9.3	4.6	11.0	5.1	11.0
CO ₂		Vol.-%	16.9	16.8	11.0	13.8	8.8	13.3	8.8
NO _x		mg/Nm ³	363	240	572	824	1'103	610	917
SO ₂		mg/Nm ³	70	72	n.g.	291	240	n.g.	n.g.
CO		mg/Nm ³	7	5	5	< 1	11	< 1	10
CH ₄		mg/Nm ³	< 1	3	12	11	5	10	14
Staub		mg/Nm ³	n.g.	5.9	n.g.	n.g.	9.1	n.g.	23.1
PCDD/F	inkl. BG	ng/Nm ³	n.g.	0.00085	n.g.	n.g.	0.00599	n.g.	0.00401
	exkl. BG	ng/Nm ³	n.g.	0.00002	n.g.	n.g.	0.00242	n.g.	0.00269
Σ16 EPA PAK	inkl. BG	mg/Nm ³	n.g.	0.00013	n.g.	n.g.	0.138	n.g.	0.871
	exkl. BG	mg/Nm ³	n.g.	0.00012	n.g.	n.g.	0.138	n.g.	0.871

BG: Bestimmungsgrenze
n.g.: nicht gemessen



Ergebnisse Pflanzkohleeigenschaften

Tabelle 7: Vergleich der Eigenschaften von Pflanzkohlen, die in den verschiedenen Anlagen produziert wurden.

Parameter	Einheit	Rinde			Weizenkleie		Kaffeeabfälle	
		PyroTube	Pyreg	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm
C _{tot}	Ma.-%	81.9	73.7	75.6	68.1	68.9	66.6	70.9
C _{org}	Ma.-%	80.6	73.0	74.5	67.6	68.8	65.1	70.2
H	Ma.-%	1.4	1.8	1.3	0.9	1	0.8	1.6
N	Ma.-%	0.66	0.97	0.79	3.43	2.9	3.14	2.53
S	Ma.-%	< 0.03	0.04	0.06	0.1	0.2	0.31	0.48
O	Ma.-%	6.4	7.8	6.9	3.1	1.9	5.1	6.4
H/C _{org}	mol/mol	0.21	0.29	0.2	0.17	0.17	0.15	0.28
O/C	mol/mol	0.059	0.079	0.069	0.034	0.021	0.057	0.068
As	mg/kg	< 0.8	1	1	< 0.8	< 0.8	< 0.8	< 0.8
Pb	mg/kg	3	5	2	< 2	< 2	< 2	< 2
Cd	mg/kg	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Cu	mg/kg	14	21	20	42	55	241	188
Ni	mg/kg	6	13	11	3	10	6	8
Hg	mg/kg	< 0.07	< 0.07	0.12	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07
Zn	mg/kg	265	271	229	313	308	63	60
Cr	mg/kg	4	16	16	< 1	7	2	12
Σ16 EPA PAK (exkl. BG)	mg/kg	n.b.	7	0.7	3.7	4.5	0.2	0.9
Σ8 EFSA PAK (exkl. BG)	mg/kg	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthen	mg/kg	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Chrom (VI)	mg/kg	n.g.	< 1	< 1	n.g.	< 1	< 1	< 1

n.b.: nicht berechenbar, da alle Werte unter Bestimmungsgrenze (BG)

n.g.: nicht gemessen

	Parameter erfüllt den Grenzwert von allen EBC-Klassen
	Parameter erfüllt nicht den Grenzwert von EBC-Futter
	Parameter erfüllt nicht den Grenzwert von EBC-Futter/AgroBio
	Parameter erfüllt nicht den Grenzwert von EBC-Futter/AgroBio/Agro/Urban/Gebrauchsmaterial



Rinde

Rinde hat mit 1'709 GWh/a das grösste zusätzlich nutzbare Energiepotenzial aller untersuchten Substrate. Anhand der Abgasemissionen wurde festgestellt, dass Rinde ein geeignetes Ausgangsmaterial ist. Bezüglich der Zusammensetzung der Pflanzenkohle wurde in den verschiedenen Pflanzenkohlen ein Zinkgehalt von über 200 mg/kg festgestellt, wodurch die Pflanzenkohle nicht für die Klassen EBC-Futter und EBC-AgroBio geeignet wäre. In einer Probe (Rinde-Pyreg) wurde ein PAK-Gehalt festgestellt, der sie für die Klasse EBC-AgroBio ungeeignet macht. Es wird jedoch angenommen, dass dieser Wert durch eine Prozessanpassung gesenkt werden könnte. Rinde ist als naturbelassener Holzbestandteil unter geltendem Recht als Pflanzenkohle-Inputsubstrat zugelassen¹. Für die Verkohlung auf heute kommerziell verfügbaren Anlagen muss die Rinde jedoch vorgetrocknet (alle Anlagen) und leicht zerkleinert (Pyreg und Biomacon) werden, was i.d.R. kein Problem darstellt.

Weizenkleie

Bei den Versuchen mit Weizenkleie waren die NO_x- und SO₂-Emissionen im Vergleich zu denen mit Rinde höher. So könnten primäre und sekundäre Massnahmen erforderlich sein, um die NO_x-Emissionen zu reduzieren. Bezüglich der Pflanzenkohle wurde in den verschiedenen Proben ein hoher Zinkgehalt von über 300 mg/kg festgestellt, wodurch die Pflanzenkohle nicht für die Klassen EBC-Futter und EBC-AgroBio geeignet wäre. Die Verwendung einer Weizenkleie mit geringerer Zinkkonzentration würde es ermöglichen, die Problematik des hohen Zinkgehalts in der Kohle zu entschärfen. Zudem wird es immer schwieriger, Weizenkleie als Futtermittel zu vermarkten, da sich u.a. ihr Stärkegehalt durch optimierte Mahlung zusehends verringert. Somit wird die Verwertung als Pflanzenkohle immer interessanter, wie auch die Nachfrage bei Mühlen zeigt. Da Weizenkleie jedoch nicht holzig ist, ist sie unter geltendem Recht als Pflanzenkohle-Inputsubstrat nicht zugelassen¹. Für die Verkohlung auf heute kommerziell verfügbaren Anlagen muss die Kleie für alle untersuchten Anlagen pelletiert werden, was am Herkunftsort bei den Getreidemühlen vergleichsweise günstig realisiert werden könnte.

Kaffeeabfälle

Bei den Kaffeeabfälle waren die NO_x-Emissionen tendenziell höher als bei Rinde aber tiefer als bei Weizenkleie. Diese dürften bei Anlagen < 2-3 MW_{th} zwar unter dem Grenzwert liegen, jedoch sind Massnahmen zur Stickoxidreduktion ab 500 kW_{th} zu empfehlen. Darüber hinaus könnten Anpassungen vorgenommen werden, um die Staubemissionen zu verringern. Und ebenso sind die nicht holzigen Kaffeeabfälle unter geltendem Recht als Pflanzenkohle-Inputsubstrat nicht zugelassen¹. Zudem fällt der erhöhte Kupfergehalt in der Pflanzenkohle auf. Beide Proben ergaben Werte, die nur eine Anwendung als EBC-Rohstoff zulassen. Diese erhöhten Werte sollten in Folgeversuchen erhärtet werden, da dieses Substrat ansonsten höchst interessant wäre. Insbesondere auch, weil das Substrat für die Verkohlung auf heute kommerziell verfügbaren Anlagen nicht aufbereitet werden muss, da es bereits bei den meisten Kaffeeröstereien vor Ort pelletiert wird und sehr trocken ist.

¹ Diese Regelung wurde im April auf Anfrage beim Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) nochmals klar bestätigt. Doch lohnt sich der Blick ins die EU: hier sind Pflanzenkohlen aus einem breiten Spektrum von organischen Materialien pflanzlichen Ursprungs laut Durchführungsverordnung (EU) 2019/2164 und gemäss der Verordnung (EG) Nr. 834/2007 als Bodenhilfsmittel im biologischen Landbau zugelassen (EU-Bio, 2019). Es gibt keine Einschränkungen hinsichtlich der Biomassen, sofern sie nicht tierischen Ursprungs sind (Schmidt et al. 2021). Im Anhang 6.7 sind in der EBC-Positivliste alle in der EU zulässigen Biomassen zur Herstellung von Pflanzenkohlen aufgeführt. Weizenkleie wie auch Kaffeeabfälle sind aufgrund dieser Liste in der EU für alle EBC-Produkte zugelassen.



Arbeitspaket 5: Ökobilanz

Die ökobilanzielle Analyse hat die Umweltauswirkung der heutigen Verwertungs- und Pyrolyse-Szenarien für jedes Substrat quantifiziert und miteinander verglichen. In den Umweltbilanzen wurden die Umwelthotspots identifiziert.

Die modellierte Ökobilanz zeigt, dass sich die Umsetzung der Pyrolysevariante bei allen Substraten im Vergleich zur heutigen Verwertung lohnen würde. Bei Weizenkleie sollten die Trade-offs zwischen reduzierten CO₂-Äquivalente-Emissionen und erhöhter Ökosystembelastung weiter untersucht werden, um eine Verwertungsmethode zu bevorzugen.

Die Aufwände der heutigen Verwertungen der untersuchten Ausgangsmaterialien werden hauptsächlich durch den Transport der Biomasse, die Verwertungsprozesse selbst und den Schwermetalleintrag bei einer Ausbringung des erzeugten Kompostes verursacht. Bei den Pyrolyse-Szenarien entstehen die Umweltwirkungen vor allem durch den Energieverbrauch für die Verwertung, den Transport der Biomasse, und die direkten Emissionen während der Pyrolyse (CH₄ und Dioxine).

Die gewährten Gutschriften (Energieproduktion, langfristige C-Speicherung, usw.) übertreffen bei allen Szenarien und Wirkungsabschätzungsmethoden die Verwertungsaufwände und ermöglichen eine negative Bilanzsumme in den Szenarien der heutigen Verwertung, sowie in den Pyrolyseszenarien.

Mit weiteren Untersuchungen sollten für alle Ausgangsmaterialien die Einflüsse der Transportwege und –mittel untersucht, die Modellierung der gewährten Gutschriften verfeinert und weitere positiven Umweltwirkungen des Pflanzenkohleeinsatzes integriert werden. In der durchgeführten Ökobilanz könnten die Unsicherheiten der erhobenen Daten die Differenzen zwischen den einzelnen Ergebnissen verändern, die allgemeinen Erkenntnisse werden jedoch als stabil beurteilt.

Arbeitspaket 6: Techno-ökonomische Bewertung

Bei der techno-ökonomischen Bewertung wurden die Wärmegestehungskosten für die Pyrolyseanlage von Biomacon in Flaach (400 kW thermisch, Biomacon 400) und die Pyrolyseanlage von Pyreg in Basel (650 kW thermisch, Pyreg 650) für das zulassungsfähige Substrat, dem Rindenmulch, ermittelt und eine umfassende **Sensitivitätsanalyse** bzgl. Substratpreis, Aufbereitungskosten, anlagenseitigen Investitionen, Anlagenauslastung, Pflanzenkohle- und Wärmeverkaufspreis sowie CO₂-Vergütung durchgeführt. Es werden dabei nicht die Wärmegestehungskosten als Mass der techno-ökonomischen Bewertung, sondern der Jahresgewinn vor Steuern (EBT, Earnings Before Taxes) ermittelt und verglichen.



Ergebnisse

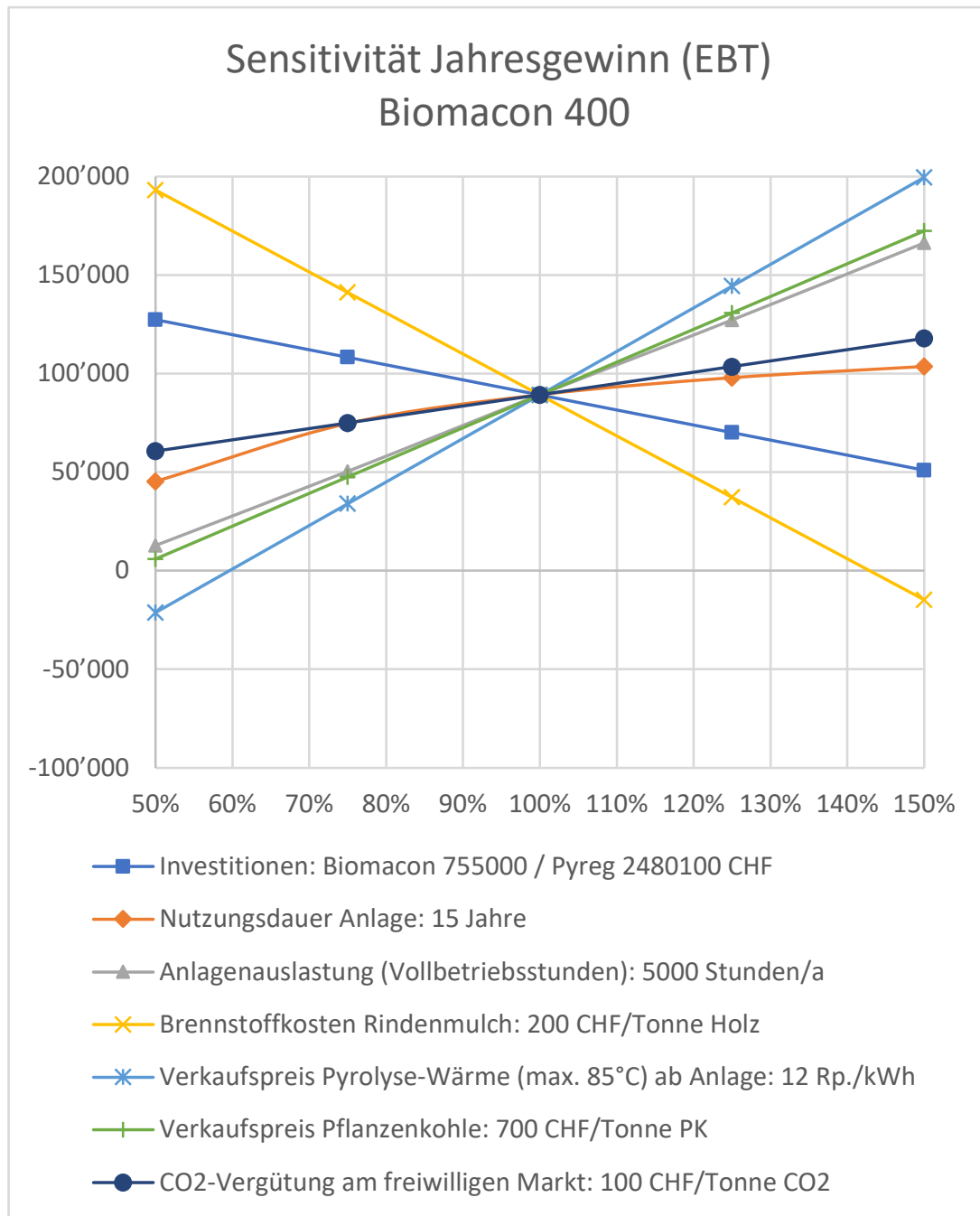


Abbildung 2: Ergebnis der Sensitivitätsberechnung der Biomacon 400 Anlage für sechs Parameter. Eine prozentuale Variation der Brennstoffkosten und des Wärme-Verkaufspreises haben den grössten Effekt auf den Jahresgewinn. Erstaunlich wenig sensitiv wirken die CO₂-Vergütungen auf den Gewinn. Die Werte in der Legende zu den einzelnen Parametern stehen jeweils für 100%.

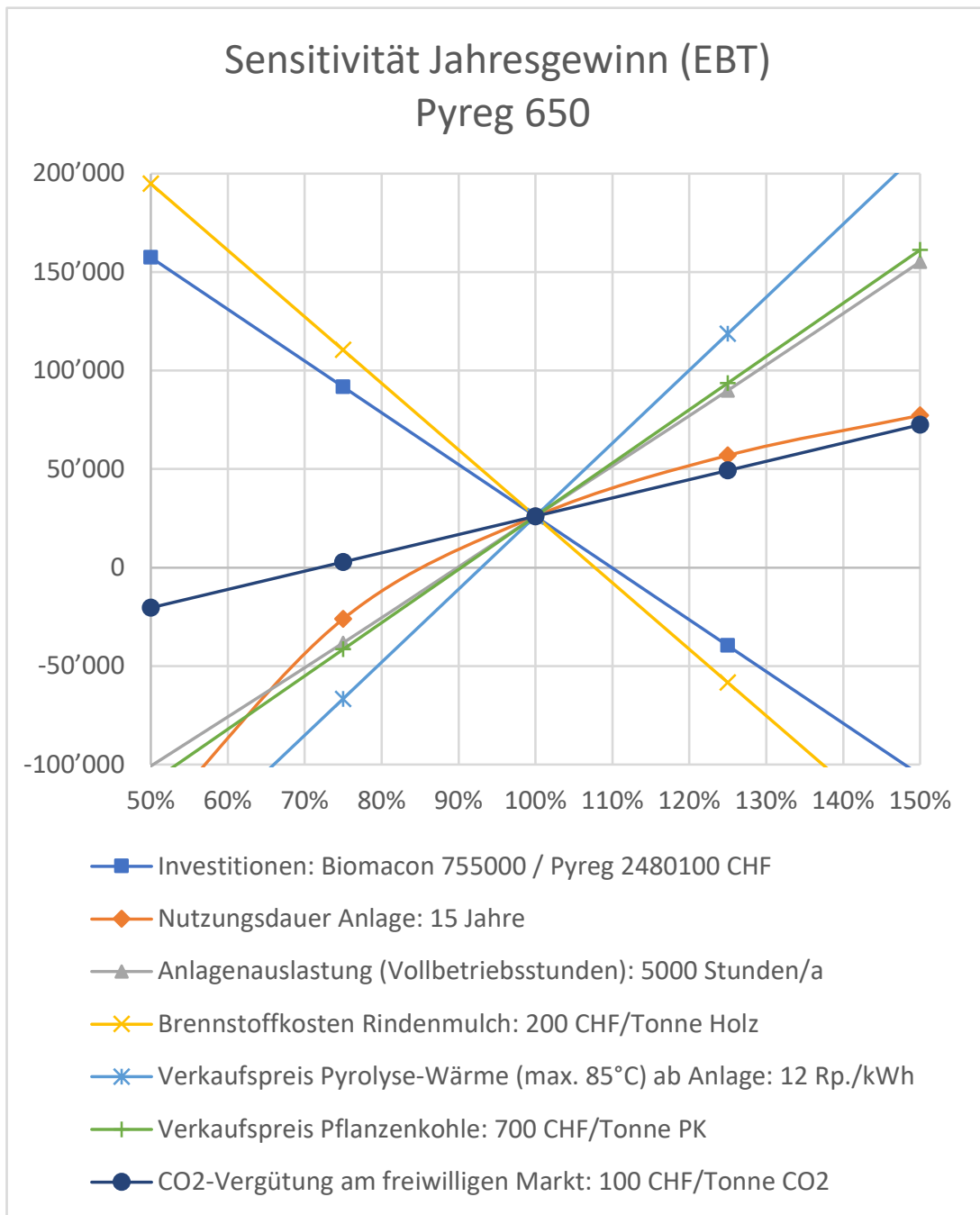


Abbildung 3: Ergebnis der Sensitivitätsberechnung der Pyreg 650 Anlage für sechs Parameter. Eine prozentuale Variation der Brennstoffkosten und des Wärme-Verkaufspreises haben den grössten Effekt auf den Jahresgewinn. Erstaunlich wenig sensitiv wirken die CO2-Vergütungen auf den Gewinn. Die Werte in der Legende zu den einzelnen Parametern stehen jeweils für 100%. Generell verhalten sich alle Parameter deutlich sensibler (steilere Kurven) als bei der Konkurrenztechnologie. Ebenso wird die Gewinnschwelle (Nulllinie) viel schneller unterschritten, auch, weil das Referenzszenario (aller Parameter bei 100%) mit einem EBT von 26'000 CHF deutlich schlechter abschneidet als bei der Konkurrenztechnologie (EBT von 89'000 CHF).



Fazit

Pyrolyseanlagen sind bereits heute wirtschaftlich zu betreiben. Doch gilt den Brennstoffkosten und dem Wärme-Verkaufspreis ein besonderes Augenmerk; eine Variation dieser Parameter haben den grössten Effekt auf die Wirtschaftlichkeit – für beide untersuchte Technologien. Auch sehr entscheidend sind der Verkaufspreis der Pflanzenkohle und die Anlagenauslastung (Vollbetriebsstunden). Erstaunlich wenig sensitiv wirkt eine mögliche CO₂-Vergütung am freiwilligen Markt auf die Wirtschaftlichkeit. Interessanterweise gilt das Gesetz der «economy of scales» bei den beiden untersuchten Technologien nicht, die um mehr als 50% leistungsfähigere Anlage schneidet wirtschaftlich klar schlechter ab.

Schlussfolgerungen und Fazit

Die Feldmessungen haben gezeigt, dass die Pflanzenkohleherstellung aus den untersuchten Substraten technisch machbar ist und die geltenden Grenzwerte bzgl. Abgasemissionen für alle Substrate eingehalten werden können. Bei den Abgasen stellen bei stickstoffreichen Substraten v.a. die entsprechend erhöhten Stickoxidemissionen im Fokus. Da sind bei Grossanlagen geeignete Entstickungsmassnahmen erforderlich. Bei der Pflanzenkohle liegen einzelne Schwermetallgehalte über den geforderten Grenzwerten. Da gilt es, die gemessenen Werte mit weiteren Messungen zu erhärten. Insbesondere die Schwermetallgehalte der Ausgangssubstrate unterliegen je nach Quelle einer grösseren Streuung und konnten im Rahmen dieser Studie nicht adäquat quantifiziert werden. Bei naturbelassenen Substraten, welche heute bereits in den Boden gelangen (über Kompostierung, Vergärung oder Fütterung), muss bedacht werden, dass bei der Pyrolyse die Schwermetalle prozessbedingt bis zu Faktor 3.5 aufkonzentriert werden. Hingegen wird Pflanzenkohle in viel geringeren Dosen und über die Jahre kumuliert in noch viel geringeren Gesamtmengen im Vergleich zu Kompost oder Gärgut in den Boden eingebracht. Die kumulierten Gesamtfracht an Schadstoffen in den Boden müsste daher näher untersucht werden und als Beurteilungsgrundlage dienen.

Dass ein exergiereicher Energieträger nur noch zu 50% energetisch genutzt wird, ist bei Energiefachleuten heute oftmals noch ein Hauptargument gegen die Pflanzenkohleproduktion aus Holz - v.a. solange noch fossile Energien genutzt werden und durch Holz ersetzt werden könnten. Tatsächlich ist bei einem solchen Vergleich die CO₂-Bilanz von Pyrolyse und Gesamtverbrennung identisch und die im Holz gespeicherte Sonnenenergie z.B. für den Winter wird weniger. Doch der ökologische Zusatznutzen der Kohle im Boden auf der einen Seite und die im Vergleich zu den neuen Erneuerbaren teurere, emissionsreichere und vom Gesamtpotenzial stark eingeschränkte Holzenergieproduktion auf der anderen Seite spricht zunehmend für eine stoffliche Nutzung von Holz. Das Holz der Zukunft ist nicht mehr primär eine Energie- sondern eine wertvolle Materialressource.



Résumé

Contexte et justification du projet

La technique de pyrolyse pour la production de biochar est désormais au point et en passe d'être produite en série. Pour la Suisse, le biochar est autorisé depuis juin 2016 dans l'Ordonnance sur les engrais en tant qu'amendement du sol. Depuis le 1er janvier 2018, cette autorisation est également valable pour l'agriculture biologique. Depuis, la demande de biochar augmente fortement. Or, jusqu'à aujourd'hui (2022), seul le bois à l'état naturel est autorisé comme matériau de base.

Dans le cadre de la présente étude, d'autres substrats que le bois (non ligneux, riches en cendres) qui pourraient être transformés en énergie thermique et en biochar par pyrolyse de manière peu polluante et économique sont analysés de manière approfondie. Aujourd'hui, ces substrats ne sont généralement pas utilisés pour la production d'énergie (ou alors seulement avec beaucoup de difficultés) mais souvent éliminés, compostés ou valorisés matériellement comme engrais ou aliments pour animaux. La pyrolyse permettrait en revanche d'exploiter leur potentiel énergétique à hauteur d'environ 50% et de stocker à long terme du CO₂ dans le sol grâce au **biochar**, d'améliorer la rétention d'eau et d'éléments nutritifs et de restituer au sol les minéraux sous une forme assimilable par les plantes.

Le projet a été divisé en six paquets de travail :

Paquet de travail 1: Évaluation du potentiel de la biomasse pour la pyrolyse

Les «nouvelles» biomasses possibles énumérées dans (Keel 2016) pour une utilisation énergétique supplémentaire sont filtrées en fonction des exigences spécifiques pour la pyrolyse et leur potentiel quantitatif est déterminé.

Dans une première étape (**sélection grossière**), les critères d'exclusion suivants sont appliqués - par ordre de priorité décroissante (l'objectif de l'exclusion est expliqué entre parenthèses) :

- I. Le substrat est cultivé dans le seul but de produire du biochar (pas de concurrence supplémentaire pour l'utilisation du sol, pas de matière première renouvelable (de: NaWaRo)).
- II. Le substrat est aujourd'hui déjà utilisé de manière écologique et économique comme fourrage (pas de concurrence alimentaire).
- III. Le substrat contient des quantités significatives de nutriments, en particulier des composés azotés, qui sont détruits lors d'un traitement thermique (pas de destruction de nutriments ni d'émissions d'oxyde d'azote).
- IV. Le substrat est contaminé par des substances étrangères non décomposables par pyrolyse en raison de son origine (pas d'apport de substances étrangères dans les sols).
- V. Le substrat est déjà utilisé aujourd'hui de manière significative comme source d'énergie, de manière écologique et économique (pas de concurrence énergétique). Le potentiel de différence entre le potentiel utilisé aujourd'hui et le potentiel utilisable durablement n'est pas concerné par ce critère d'exclusion.
- VI. Le substrat est très humide ou peut difficilement être séché en raison de son origine (pas de frais de séchage disproportionnés).

Dans un deuxième temps, les substrats sont analysés afin de déterminer s'ils répondent aux critères suivants (**sélection fine**) :

- Potentiels massiques, énergétiques et disponibilités en Suisse



- Propriétés physiques du substrat (sans préparation)
- Propriétés chimiques du substrat
- Effort de préparation et de pyrolyse
- Qualité prévue du biochar
- Émissions de gaz prévues

Sur les 32 substrats analysés, 18 substrats ont passé la sélection grossière et finalement six substrats ont passé la sélection fine :

- Litière de fumier de cheval (ci-après dénommée *fumier de cheval*)
- Déchets de meunerie
- Déchets de torréfaction du café (ci-après dénommés *déchets de café*)
- Bois de forêt, écorce uniquement (ci-après dénommé *écorce*)
- Séparation du bois-digestion anaérobie (ci-après dénommée *bois-digestion anaérobie*)
- Séparation du bois-digestion anaérobie (ci-après dénommé *bois compostage*)

Les potentiels d'énergie et de biochar de ces six substrats sont illustrés dans la figure 4.

La sélection montre que les substrats qui se prêtent le mieux à la pyrolyse sont ceux qui sont les plus proches du bois. La pyrolyse de l'écorce possède un potentiel théorique très élevé. D'une part, parce qu'elle pourrait représenter près de la moitié du potentiel énergétique supplémentaire et de la production de biochar. D'autre part, parce qu'elle n'est pas critique en ce qui concerne les substances délicates comme le soufre et le chlore.

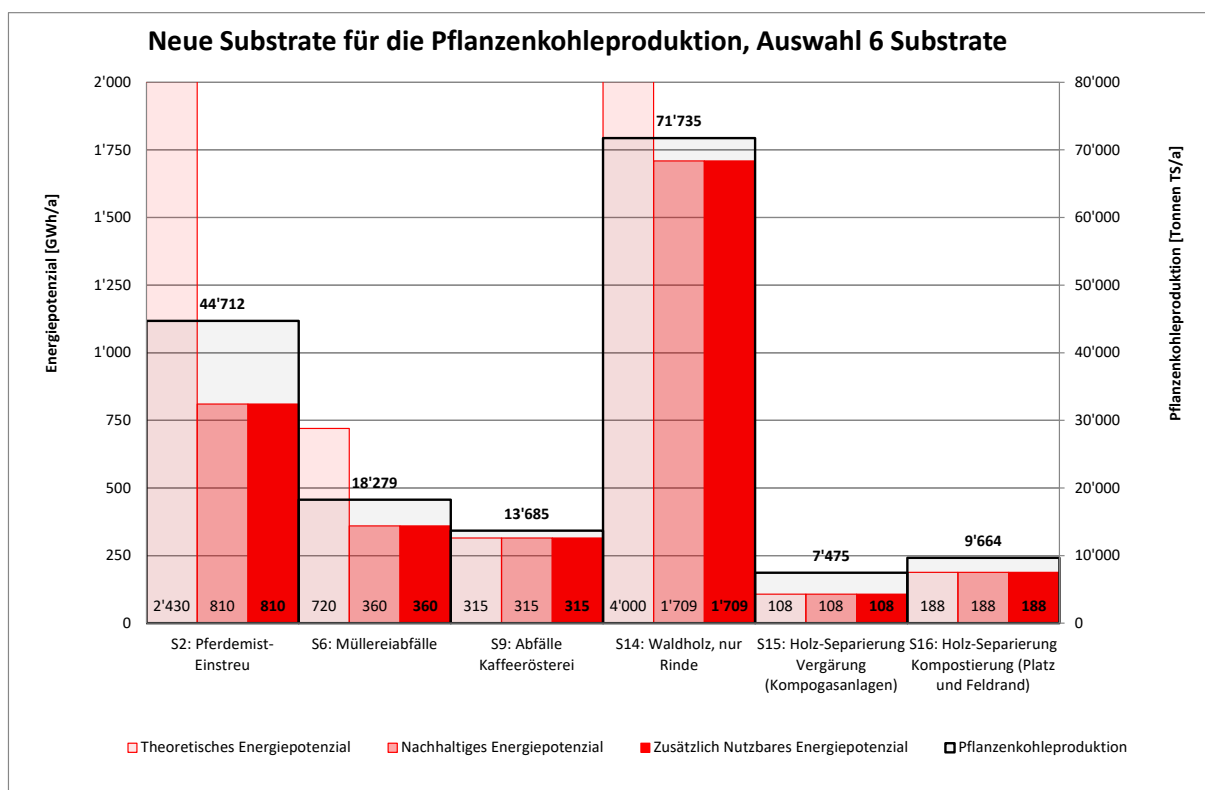


Figure 1: Potentiels d'énergie et de biochar des six substrats étudiés après la sélection fine. Le cadre noir "production de biochar" représente la production théorique si le potentiel énergétique supplémentaire utilisable était transformé en biochar (23% par rapport à la teneur en masse de matière sèche, valeurs empiriques de Kaskad-E). Dans ce cas, environ 50% du potentiel énergétique supplémentaire serait «donné» au biochar.

Paquets de travail 2 et 3: Prétraitement des substrats et essais de pyrolyse sur une installation de laboratoire

Les essais en laboratoire ont tous eu lieu sur l'installation de laboratoire PyroTube, construite spécialement à cet effet. Cette installation de pyrolyse en continu à la FHNW a une puissance variable comprise entre 3.5 kW et 8 kW thermiques, selon le type et la quantité de combustible pyrolysé.

Pour la pyrolyse en laboratoire, tous les substrats doivent être séchés puis granulés (à l'exception des copeaux de bois et du bois séparé pour le compostage), sinon des problèmes surviennent lors du transport dans et à travers l'installation (obstructions, débit irrégulier des substrats). Les copeaux de bois et le bois-compostage ont simplement été broyés.



Tableau 1: Aperçu des essais réalisés. Les plaquettes de bois font office de référence et le son de blé est considéré comme principal déchet de meunerie (à la place des déchets d'orge). Pour le fumier de cheval et le bois-digestion anaérobie, les dioxines (PCDD/F) ont également mesurées.

Essai	Date	Substrat	Pyrolyse	
			Température (moyenne)	Temps de rétention
			°C	min
1	18.02.2020	Fumier de cheval	656	28
2	22.05.2020	Plaquettes de bois (référence)	735	28
3	23.06.2020	Déchets de café	739	28
4	21.09.2020	Déchets de meunerie (déchets d'orge)	715	28
5	30.10.2020	Bois-Compostage	762	17
6	01.12.2020	Écorce	702	28
7	10.12.2020	Bois-digestion anaérobie	713	28
8	15.12.2020	Fumier de cheval (Mesure de PCDD/F)	770	28
9	10.03.2021	Bois-digestion anaérobie (Mesure de PCDD/F)	765	28
10	07.05.2021	Déchets de meunerie (son de blé)	721	28

Résultats des analyses de substrats

Tableau 2: Propriétés des substrats étudiés (autres propriétés, voir annexe 11.3).

Substrat	Teneur en cendres	Teneur en eau	Densité apparente	Pouvoir calorifique inférieur (sec)	Densité énergétique	C	H	N	S
	% de masse _{ms}	% de masse	kg/m ³	MJ/kg _{ms}	MJ/m ³	% de masse _{ms}			
Plaquettes de bois	1.3	7.8	209	18.4	3'845	52.5	6.7	0.07	0.01
Fumier de cheval	7.9	10.2	376	18.3	6'881	49.5	4.6	2.5	0.15
Déchets d'orge	2.8	22.1	479	17.4	8'335	48.6	4.5	1.96	0.18
Son de blé	7.2	9.9	365	17.5	6'388	47.4	4.8	2.8	0.2
Déchets de café	7.6	6.5	752	17.8	13'386	49.3	6.4	2.89	0.23
Écorce	2.5	15.8	592	18.7	11'070	49.7	4.6	0.4	0.01
Bois-Digestion anaérobie	19.8	8.6	581	14.0	8'134	38.3	3.6	1.11	0.08
Bois-Compostage	17.9	12.2	252	17.7	4'460	42.3	3.9	1.07	0.15

ms: matière sèche



Résultats des émissions de gaz d'échappement

Tableau 3: Aperçu des résultats des émissions de gaz d'échappement (les valeurs mesurées et les valeurs limites de l'OPair sont valables pour une teneur résiduelle en oxygène de 13%).

Substrat	CO	SO ₂	CH ₄	NO ₂	PCDD/F (incl. LQ)
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	ng/Nm ³
Plaquettes de bois	20	n.m.	< 1	86	n.m.
Fumier de cheval	1	185	3	355	n.m.
Fumier de cheval (Mesure de PCDD/F)	7	n.m.	7	480	0.21
Déchets d'orge	3	n.m.	7	560	n.m.
Son de blé	< 1	291	11	824	n.m.
Déchets de café	< 1	n.m.	10	610	n.m.
Écorce	7	70	< 1	363	n.m.
Bois-Digestion anaérobie	< 1	170	5	504	n.m.
Bois-Digestion anaérobie (Mesure de PCDD/F)	22	201	3	497	0.38
Bois-Compostage	50	88	< 1	326	n.m.

LQ: limite de quantification

n.m.: non mesuré ou mesuré, mais données inutilisables. Les mesures d'émissions de SO₂ sont généralement à prendre avec précaution et les dépassements de valeurs limites ne sont pas utilisés comme critère d'exclusion stricte.

	Paramètre conforme à toutes les valeurs limites
	Paramètre < 50% au-dessus de la valeur limite selon l'art. 71 ou 74 OPair
	Paramètre 50%-400% supérieur à la valeur limite selon l'art. 71 ou 74 OPair
	Paramètre dépassant de > 400% la valeur limite selon l'art. 71 ou 74 OPair



Résultats Propriétés du biochar

Tableau 4: Aperçu des propriétés du biochar. Les valeurs limites pour toutes les classes EBC se trouvent dans l'annexe au paragraphe 11.1 à la page 123. Les explications relatives aux abréviations utilisées figurent dans la liste des abréviations à la page 7.

	C _{tot}	H/C _{org}	As	Pb	Cd	Cu	Ni	Hg	Zn	Cr	Σ16 EPA HAP (excl. LQ)	Σ8 EFSA HAP (excl. LQ)	Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthen	Chrom-VI	PCDD/F+PCB (incl. LQ)	Σ6 DIN-PCB (incl. LQ)
	Ma.- %	mol/ mol	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	mg/ kg	ng/ kg	µg/ kg
Plaquettes de bois	89.5	0.18	< 0.8	< 2	< 0.2	6	4	<0.07	529	6	105	6.1	n.g.	< 0.5	n.g.	n.g.
Fumier de cheval	73.1	0.24	< 0.8	< 2	< 0.2	45	335	<0.07	259	722	6.7	n.c.	n.g.	< 0.5	1.3	1.16
Déchets d'orge	71.2	0.31	< 0.8	4	< 0.2	35	15	<0.07	134	28	0.7	n.c.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Son de blé	68.1	0.17	< 0.8	< 2	< 0.2	42	3	<0.07	313	< 1	3.7	n.c.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Déchets de café	66.6	0.15	< 0.8	< 2	< 0.2	241	6	<0.07	63	2	0.2	n.c.	n.g.	< 0.5	n.g.	n.g.
Écorce	81.9	0.21	< 0.8	3	< 0.2	14	6	<0.07	265	4	n.c.	n.c.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Bois-Digestion anaérobie	55.4	0.16	2.7	20	< 0.2	45	16	<0.07	183	52	n.c.	n.c.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Bois-Compostage	63.5	0.13	3.3	8	< 0.2	93	18	<0.07	102	32	1.1	n.c.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.

n.c. : non calculable, car toutes les valeurs sont inférieures à la limite de quantification (LQ)

n.m. : non mesuré

	Paramètre conforme à la valeur limite pour toutes les classes EBC
	Paramètre non conforme à la valeur limite de EBC-Futter
	Paramètre non conforme à la valeur limite pour EBC-Futter/AgroBio
	Paramètre non conforme à la valeur limite pour EBC-Futter/AgroBio/Agro/Urban/Gebrauchsmaterial



Paquet de travail 4: Essais de pyrolyse sur deux installations commerciales

Dans le cadre du paquet de travail 4, trois des substrats testés précédemment dans l'installation de laboratoire ont été testés sur une installation de pyrolyse commerciale (installation Pyreg à Bâle) et une installation pilote (installation PyroFarm à Stettlen) : (i) écorce, (ii) son de blé et (iii) déchets de café. Les gaz d'échappement issus de la combustion des gaz de pyrolyse et la composition du biochar ont été mesurés.

Tableau 5: Aperçu des essais réalisés.

Essai	Date	Substrat	Installation
1	14.09.2021	Écorce	Pyreg PX1500
2	17.09.2021	Son de blé	PyroFarm P40
3	22.09.2021	Déchets de café	PyroFarm P40
4	23.09.2021	Écorce	PyroFarm P40

Résultats des mesures des gaz d'échappement

Tableau 6: Résultats des mesures des gaz d'échappement de l'écorce, du son de blé et des déchets de café, mesurés dans différentes installations.

			Écorce			Son de blé		Déchets de café	
Paramètre		Unité	PyroTube	Pyreg	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm
O ₂		Vol.-%	2.2	3.9	9.3	4.6	11.0	5.1	11.0
CO ₂		Vol.-%	16.9	16.8	11.0	13.8	8.8	13.3	8.8
NO _x		mg/Nm ³	363	240	572	824	1'103	610	917
SO ₂		mg/Nm ³	70	72	n.m.	291	240	n.m.	n.m.
CO		mg/Nm ³	7	5	5	< 1	11	< 1	10
CH ₄		mg/Nm ³	< 1	3	12	11	5	10	14
Particules		mg/Nm ³	n.m.	5.9	n.m.	n.m.	9.1	n.m.	23.1
PCDD/F	incl. LQ	ng/Nm ³	n.m.	0.00085	n.m.	n.m.	0.00599	n.m.	0.00401
	excl. LQ	ng/Nm ³	n.m.	0.00002	n.m.	n.m.	0.00242	n.m.	0.00269
Σ16 EPA HAP	incl. LQ	mg/Nm ³	n.m.	0.00013	n.m.	n.m.	0.138	n.m.	0.871
	excl. LQ	mg/Nm ³	n.m.	0.00012	n.m.	n.m.	0.138	n.m.	0.871

LQ: limite de quantification

n.m.: non mesuré



Résultats - Propriétés du biochar

Tableau 7: Comparaison des caractéristiques des biochars produits dans les différentes installations.

Paramètre	Unité	Écorce			Son de blé		Déchets de café	
		PyroTube	Pyreg	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm
C _{tot}	Ma.-%	81.9	73.7	75.6	68.1	68.9	66.6	70.9
C _{org}	Ma.-%	80.6	73.0	74.5	67.6	68.8	65.1	70.2
H	Ma.-%	1.4	1.8	1.3	0.9	1	0.8	1.6
N	Ma.-%	0.66	0.97	0.79	3.43	2.9	3.14	2.53
S	Ma.-%	< 0.03	0.04	0.06	0.1	0.2	0.31	0.48
O	Ma.-%	6.4	7.8	6.9	3.1	1.9	5.1	6.4
H/C _{org}	mol/mol	0.21	0.29	0.2	0.17	0.17	0.15	0.28
O/C	mol/mol	0.059	0.079	0.069	0.034	0.021	0.057	0.068
As	mg/kg	< 0.8	1	1	< 0.8	< 0.8	< 0.8	< 0.8
Pb	mg/kg	3	5	2	< 2	< 2	< 2	< 2
Cd	mg/kg	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Cu	mg/kg	14	21	20	42	55	241	188
Ni	mg/kg	6	13	11	3	10	6	8
Hg	mg/kg	< 0.07	< 0.07	0.12	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07
Zn	mg/kg	265	271	229	313	308	63	60
Cr	mg/kg	4	16	16	< 1	7	2	12
Σ16 EPA HAP (excl. LQ)	mg/kg	n.c.	7	0.7	3.7	4.5	0.2	0.9
Σ8 EFSA HAP (excl. LQ)	mg/kg	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.
Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthén	mg/kg	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Chrome (VI)	mg/kg	n.m.	< 1	< 1	n.m.	< 1	< 1	< 1

n.c.: non calculable, car toutes les valeurs sont inférieures à la limite de quantification (LQ)

n.m.: non mesuré

	Paramètre conforme à la valeur limite pour toutes les classes EBC
	Paramètre non conforme à la valeur limite de EBC-Futter
	Paramètre non conforme à la valeur limite pour EBC-Futter/AgroBio
	Paramètre non conforme à la valeur limite pour EBC-Futter/AgroBio/Agro/Urban/Gebrauchsmaterial



Écorce

Avec 1'709 GWh/a, l'écorce présente le plus grand potentiel énergétique supplémentaire utilisable de tous les substrats étudiés. Sur la base des émissions de gaz, il a été constaté que l'écorce est un matériau de base approprié. En ce qui concerne la composition du biochar, une teneur en zinc de plus de 200 mg/kg a été constatée dans les différents biochars à base d'écorce, ce qui rendrait le biochar impropre aux classes EBC-Futter et EBC-AgroBio. Dans un échantillon (écorce-pyreg), une teneur en HAP a été constatée, ce qui le rendrait impropre à la classe EBC-AgroBio. Il est toutefois possible de supposer que cette valeur pourrait être réduite par une adaptation du processus. L'écorce, en tant que composant naturel du bois, est autorisée par la législation en vigueur comme substrat d'entrée pour le biochar¹. Pour la pyrolyse dans les installations actuellement disponibles sur le marché, l'écorce doit toutefois être préséchée (valable pour toutes les installations) et légèrement broyée (Pyreg et Biomacon), ce qui ne pose généralement pas de problème.

Son de blé

Dans les essais avec du son de blé, les émissions de NO_x et de SO₂ étaient plus élevées par rapport à ceux avec de l'écorce. Ainsi, des mesures primaires et secondaires pourraient être nécessaires pour réduire les émissions de NO_x. En ce qui concerne le biochar, une teneur élevée en zinc, supérieure à 300 mg/kg, a été constatée dans les différents échantillons, ce qui rendrait le biochar impropre aux classes EBC-Futter et EBC-AgroBio. L'utilisation d'un son de blé avec une concentration en zinc plus faible permettrait d'atténuer la problématique de la teneur élevée en zinc dans le biochar. En outre, il est de plus en plus difficile de commercialiser le son de blé comme aliment pour animaux, car sa teneur en amidon, entre autres, diminue en raison d'une mouture optimisée. La valorisation sous forme de biochar devient donc de plus en plus intéressante, comme le démontre également l'intérêt des meuneries pour une valorisation alternative. Toutefois, comme le son de blé n'est pas ligneux, il n'est pas autorisé par la législation en vigueur comme substrat d'entrée pour le biochar². Pour la pyrolyse dans les installations actuellement disponibles sur le marché, le son doit être transformé en pellets pour toutes les installations étudiées, ce qui pourrait être réalisé à un prix relativement avantageux sur le lieu d'origine, dans les meuneries.

Déchets de café

Pour les déchets de café, les émissions de NO_x montrent une tendance à être plus élevées que pour l'écorce mais plus faibles que pour le son de blé. Elles sont certes inférieures à la valeur limite pour les installations < 2-3 MW_{th}, mais des mesures de réduction des oxydes d'azote sont recommandées à partir de 500 kW_{th}. En plus de cela, des adaptations pourraient être apportées pour réduire les émissions de particules. Les déchets de café non ligneux ne sont pas autorisés comme substrat d'entrée du biochar en vertu de la législation actuelle¹. En outre, la teneur élevée en cuivre dans le biochar attire l'attention. Les deux échantillons ont donné des valeurs qui ne permettent qu'une utilisation comme matériau EBC-Rohstoff. Ces valeurs élevées devraient être étudiées plus en détail, car ce substrat possède un potentiel très intéressant, d'autant plus que ce substrat n'a pas besoin d'être préparé pour la pyrolyse sur les installations actuellement disponibles dans le commerce, car il est déjà granulé sur place chez la plupart des torréfacteurs de café et est très sec.

² Cette réglementation a été clairement réaffirmée en avril suite à une demande adressée à l'Office fédéral de l'agriculture (OFAG). Mais il vaut la peine de regarder du côté de l'UE : les biochars issus d'un large éventail de matières organiques d'origine végétale sont autorisés en tant qu'adjuvants du sol dans l'agriculture biologique selon le règlement d'exécution (UE) 2019/2164 et conformément au règlement (CE) n° 834/2007 (UE-Bio, 2019). Il n'y a pas de restrictions concernant les biomasses, pour autant qu'elles ne soient pas d'origine animale (Schmidt et al. 2021). L'annexe 6.7 présente, dans la liste positive EBC, toutes les biomasses autorisées dans l'UE pour la production de biochar. Le son de blé ainsi que les déchets de café sont autorisés dans l'UE sur la base de cette liste pour tous les produits EBC.



Paquet de travail 5: Analyse du cycle de vie

L'analyse du bilan écologique a quantifié et comparé l'impact environnemental des scénarios actuels de valorisation avec ceux de pyrolyse pour chaque substrat.

L'analyse du cycle de vie modélisée montre que la mise en œuvre de la variante de pyrolyse serait rentable pour tous les substrats par rapport aux scénarios de valorisation actuelle. Dans le cas du son de blé, les compromis entre la réduction des émissions d'équivalents CO₂ et l'augmentation de la charge sur l'écosystème devraient être étudiés plus en détail afin de privilégier une méthode de valorisation.

Les impacts environnementaux des valorisations actuelles des matières premières étudiées sont principalement dus au transport de la biomasse, aux processus de valorisation eux-mêmes et à l'apport de métaux lourds en cas d'épandage du compost produit. Dans les scénarios de pyrolyse, les impacts environnementaux sont principalement dus à la consommation d'énergie pour la valorisation, au transport de la biomasse, et aux émissions directes pendant la pyrolyse (CH₄ et dioxines).

Les crédits accordés (production d'énergie, stockage de carbone à long terme, etc.) dépassent les impacts cumulés dans tous les scénarios et méthodes d'évaluation, permettant ainsi d'obtenir un bilan négatif dans les scénarios de valorisation actuels, ainsi que dans les scénarios de pyrolyse.

Des études supplémentaires devraient permettre d'examiner pour tous les substrats de départ l'influence des distances et des moyens de transport, d'affiner la modélisation des crédits accordés et d'intégrer d'autres impacts environnementaux positifs liés à l'utilisation du biochar. Dans l'écobilan réalisé, les incertitudes des données collectées pourraient réduire les différences entre les différents résultats, mais les conclusions générales sont jugées stables.

Paquet de travail 6: Évaluation techno-économique

Dans le cadre de l'évaluation techno-économique, les coûts de production de chaleur de l'installation de pyrolyse de Biomacon à Flaach (400 kW thermiques, Biomacon 400) et de l'installation de pyrolyse de Pyreg à Bâle (650 kW thermiques, Pyreg 650) ont été déterminés pour le substrat admissible, le paillis d'écorce, et une **analyse de sensibilité** complète a été réalisée concernant le prix du substrat, les coûts de préparation, les investissements du côté de l'installation, l'utilisation de l'installation, le prix de vente du biochar et de la chaleur ainsi que la compensation du CO₂. Ce ne sont pas les coûts de production de chaleur qui sont utilisés comme mesure de l'évaluation techno-économique, mais le bénéfice annuel avant impôts (EBT, Earnings Before Taxes) qui est calculé et comparé.



Résultats

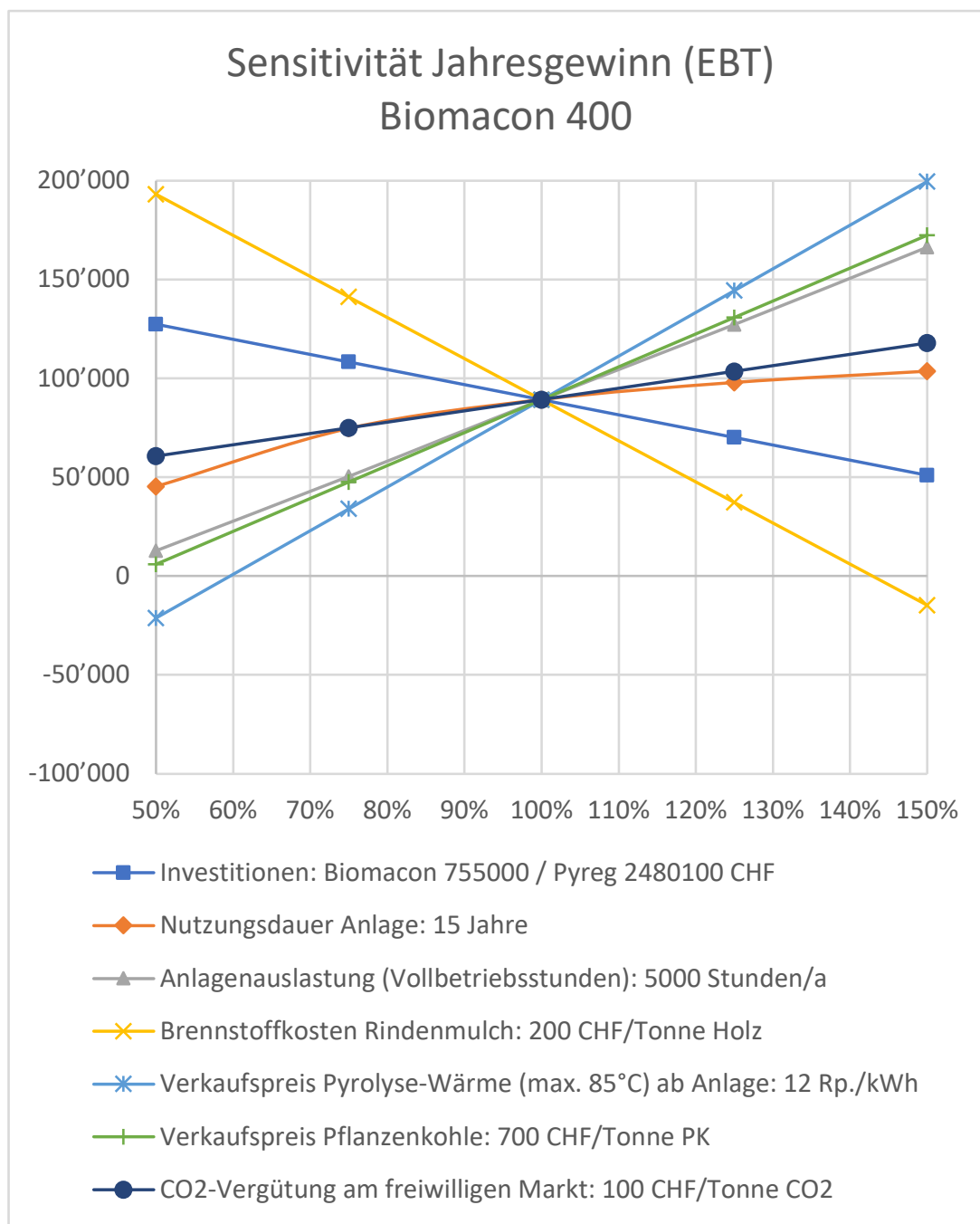


Figure 2: Résultat du calcul de sensibilité de l'installation Biomacon 400 pour six paramètres. Une variation en pourcentage des coûts des combustibles et du prix de vente de la chaleur a l'effet le plus important sur le bénéfice annuel. Les compensations de CO₂ ont un effet étonnamment peu sensible sur le bénéfice. Les valeurs indiquées dans la légende des différents paramètres correspondent à 100%.

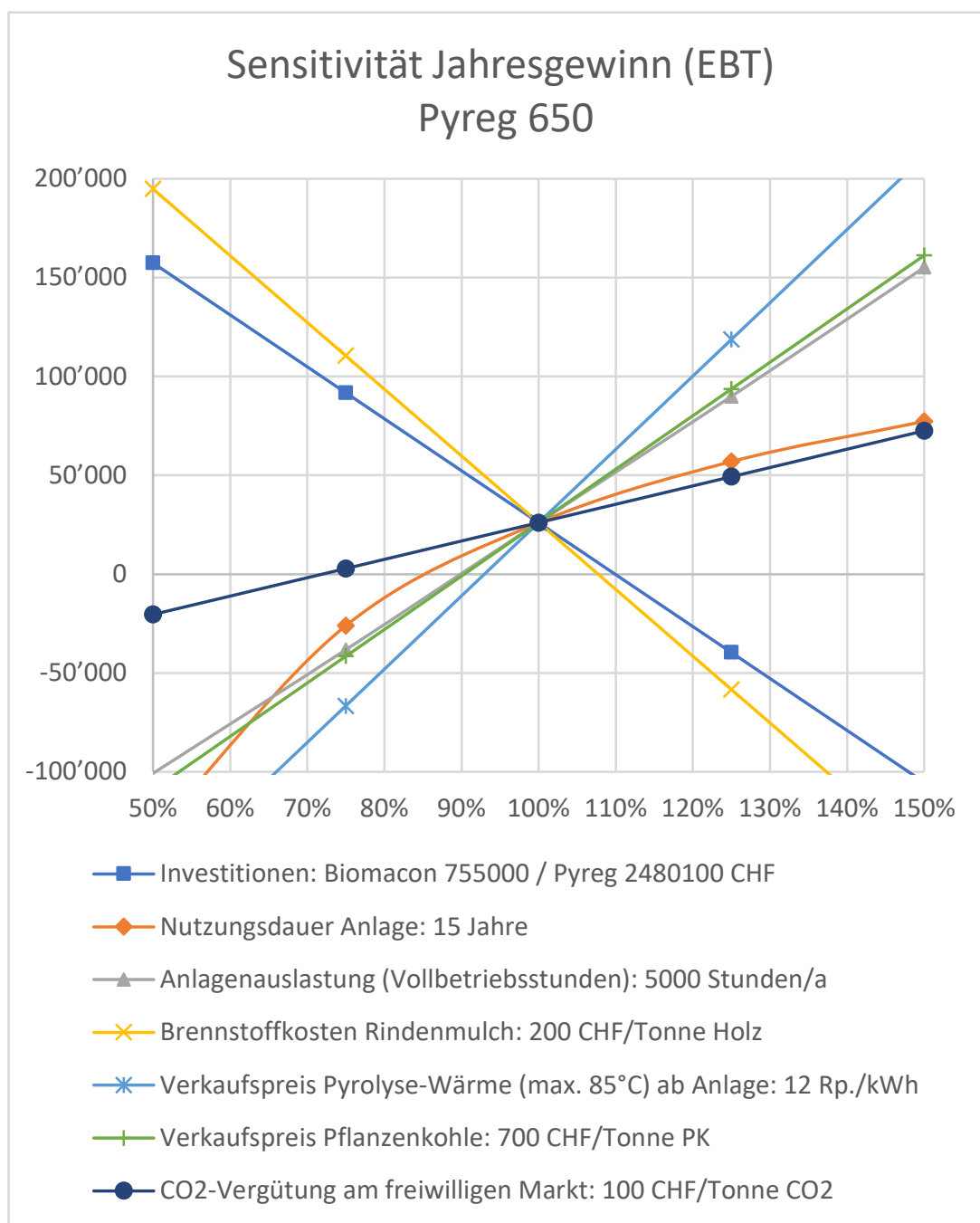


Figure 3: Résultat du calcul de sensibilité de l'installation Pyreg 650 pour six paramètres. Une variation en pourcentage des coûts de combustible et du prix de vente de la chaleur a l'effet le plus important sur le bénéfice annuel. Les compensations de CO₂ ont un effet étonnamment peu sensible sur le bénéfice. Les valeurs indiquées dans la légende des différents paramètres correspondent à 100%. De manière générale, tous les paramètres se comportent de manière nettement plus sensible (courbes plus raides) que pour la technologie concurrente. De même, le seuil de rentabilité (ligne zéro) est atteint beaucoup plus rapidement, notamment parce que le scénario de référence (tous les paramètres à 100%), avec un EBT de 26 000 CHF, est nettement moins performant que celui de la technologie concurrente (EBT de 89 000 CHF).



Conclusion

Les installations de pyrolyse sont déjà rentables aujourd'hui. Il convient toutefois d'accorder une attention particulière aux coûts des combustibles et au prix de vente de la chaleur ; une variation de ces paramètres a le plus grand effet sur la rentabilité - pour les deux technologies étudiées. Le prix de vente du biochar et le taux d'utilisation de l'installation (heures de fonctionnement à plein régime) sont également très décisifs. L'éventuelle compensation du CO₂ sur le marché a un effet étonnamment peu sensible sur la rentabilité. Il est intéressant de constater que la loi de l'économie d'échelle ne s'applique pas aux deux technologies étudiées, l'installation ayant la plus grande capacité obtient un résultat économique nettement moins bon.

Conclusions

Les campagnes de mesures effectuées ont montré que la production de biochar à partir des substrats étudiés est techniquement réalisable et que les valeurs limites en vigueur concernant les émissions de gaz d'échappement peuvent être respectées pour tous les substrats. En ce qui concerne les gaz d'échappement, les substrats riches en azote présentent surtout des émissions d'oxyde d'azote plus élevées. Pour les grandes installations, des mesures de dénitrification appropriées sont nécessaires. Pour le biochar, certaines teneurs en métaux lourds sont supérieures aux valeurs limites autorisées. Les teneurs en métaux lourds des substrats de départ, en particulier, sont soumises à une grande variabilité selon la source et n'ont pas pu être quantifiées de manière adéquate dans le cadre de cette étude. Ces résultats devraient être vérifiées dans le cadre de projets futurs. Dans le cas des substrats naturels qui sont aujourd'hui déjà utilisés dans le sol (via le compostage, la digestion anaérobie ou l'alimentation animale), il faut tenir compte du fait que la pyrolyse concentre les métaux lourds jusqu'à un facteur 3.5 en raison du processus. En revanche, le biochar est introduit dans le sol à des doses beaucoup plus faibles et en quantités totales cumulées au fil des ans encore bien plus faibles que celles du compost ou du digestat. La charge totale cumulée de polluants dans le sol devrait donc être étudiée plus en détail et servir de base d'évaluation.

Le fait qu'un substrat à potentiel énergétique important ne soit utilisé qu'à 50% à des fins énergétiques est encore aujourd'hui souvent employé comme argument contre la production de biochar à partir du bois - surtout tant que des énergies fossiles sont encore utilisées et pourraient être remplacées par le bois. En effet, dans une telle comparaison, le bilan de CO₂ de la pyrolyse et de la combustion totale est identique et l'énergie solaire stockée dans le bois, par exemple pour l'hiver, diminue. Mais l'avantage écologique supplémentaire du biochar dans le sol, d'une part, et la production d'énergie à partir du bois, plus coûteuse, plus riche en émissions et très limitée en termes de potentiel global par rapport aux nouvelles énergies renouvelables, d'autre part, plaident de plus en plus en faveur d'une utilisation matérielle du bois. Le bois de l'avenir n'est plus en premier lieu une ressource énergétique, mais une ressource matérielle précieuse.



Summary

Background information and purpose of the project

Pyrolysis technology for the production of biochar is mature and currently in transition to series production. For Switzerland, biochar has been approved in the Fertiliser Ordinance as a means of soil enhancement since June 2016. Since 1 January 2018, this approval has also applied to organic farming. Since then, the demand for biochar has risen sharply. However, until today (2022), only untreated wood is permitted as a raw material for biochar production.

Within the scope of the present study, further (non-woody, ash-rich) substrates are being investigated in detail, which could be converted into thermal energy and biochar by means of pyrolysis in a low-pollutant and economical way. Today, these substrates are usually not used for energy or only at great expense, but are often disposed of, composted or used as fertiliser or animal feed. Carbonisation, on the other hand, could utilise about 50% of their energy potential and, with the **biochar**, store CO₂ in the soil for the long term, improve water and nutrient storage and return minerals to the soil in a form that is available to plants.

The project was divided into six work packages:

Work Package 1: Assessment of the biomass potential for pyrolysis

The possible “new” biomasses for additional energy use listed in (Keel 2016) are filtered regarding the specific requirements for pyrolysis and their volume potential is determined.

In a first step (**rough selection**), the following exclusion criteria - ordered by descending priority - are applied (the objective for the exclusion is explained in parentheses in each case):

- I. Substrate is cultivated with the sole purpose of producing biochar (no additional land use competition, no renewable raw material (NaWaRo)).
- II. Today, substrate is already used as feed in an ecologically and economically sensible way (no competition with food).
- III. Substrate contains significant amounts of nutrients, especially nitrogen compounds, which are destroyed during thermal treatment (no nutrient destruction and nitrogen oxide emissions).
- IV. Substrate is contaminated with pyrolytically non-decomposable foreign substances due to its origin (no foreign substance input into the soils)
- V. Substrate is already being used today as an ecologically and economically sensible energy source (no energy competition). The difference between the potential used today and the potential that can be used sustainably is not affected by this exclusion criterion.
- VI. Substrate is very moist or difficult to dry due to its origin (no disproportionate drying effort).

In a second step, the substrates are examined for the fulfilment of the following criteria (**fine selection**):

- Mass, energy potentials and availabilities in Switzerland
- Substrate physical properties (without preparation)
- Substrate chemical properties
- Effort for preparation and pyrolysis
- Expected biochar quality
- Expected exhaust emissions



Of the 32 substrates examined, 18 substrates passed the rough selection and six substrates passed the fine selection:

- Horse manure bedding (hereinafter referred to as *horse manure*)
- Milling waste
- Coffee roasting plant waste (hereinafter referred to as *coffee waste*)
- Forest wood, bark only (hereinafter referred to as *bark*)
- Wood separation from anaerobic digestion (hereinafter referred to as *wood-digestion*)
- Wood separation from composting (hereinafter referred to as *wood-composting*)

The energy and biochar potentials of these six substrates are illustrated in figure 7.

The selection indicates that substrates best suited for biochar production are those that are most closely related to wood. The pyrolysis of tree bark would be highly interesting. On the one hand, because it could account for almost half of the additional energy potential and biochar production. On the other hand, because it is uncritical with regard to sensitive substances such as sulphur and chlorine.

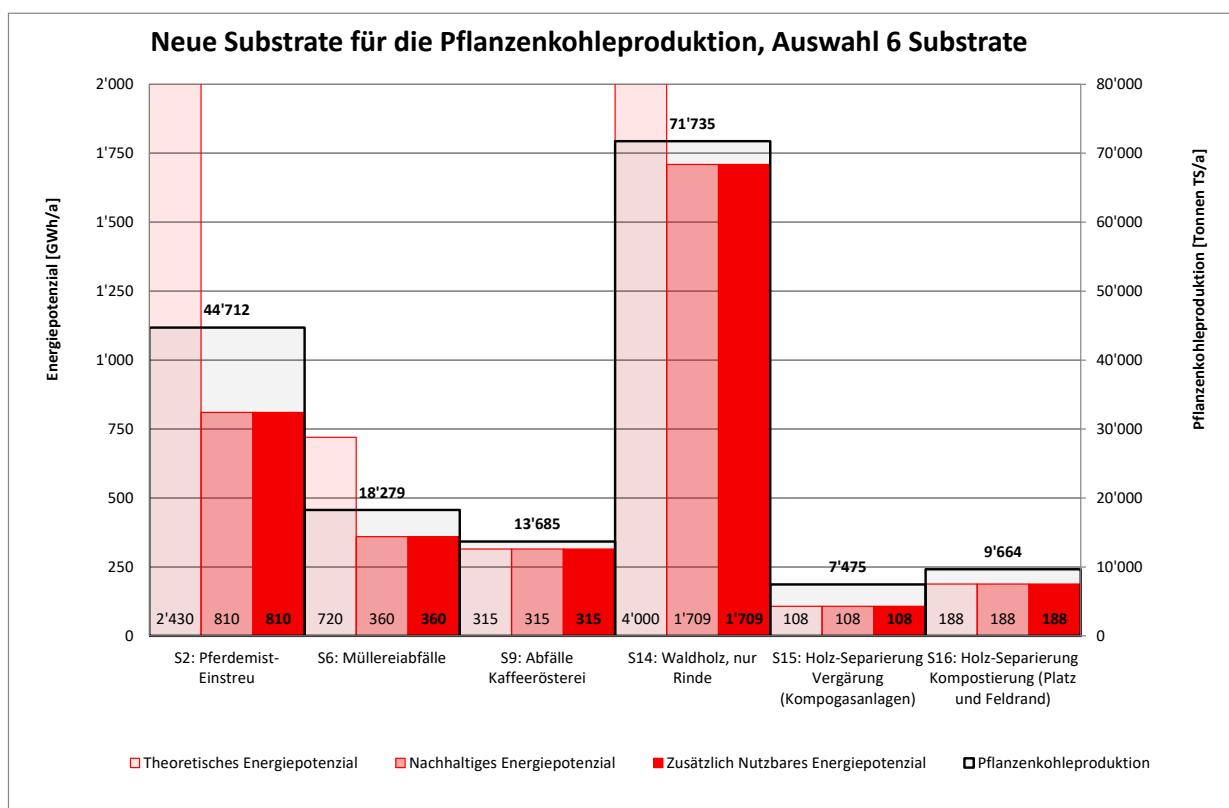


Figure 1: Energy and biochar potentials of the six substrates investigated after fine selection. The bar with the black border "biochar production" would be achieved if the entire substrate of the additional usable energy potential were converted to biochar (23% with regard to the dry matter mass content, empirical values Kaskad-E). In this case, approx. 50% of the additional energy potential of the biochar would be "lost".



Work package 2 and 3: Pre-treatment of the substrates and pyrolysis tests on a laboratory rig

The laboratory tests all took place on the PyroTube laboratory rig, which was set up specifically for this purpose. This continuous pyrolysis rig at FHNW has a variable output of between 3.5 kW and 8 kW thermal, depending on the type and quantity of fuel pyrolysed.

For the laboratory pyrolysis, all substrates must be dried and then pelletised (except for woodchips and wood-separated from composting), as otherwise there are problems with conveying the starting material into and through the plant (blockages, irregular substrate throughput). Wood chips and wood separation composting were only additionally crushed.

Table 1: Overview of the trials carried out. Wood chips are measured as a reference and wheat bran as the main part of the milling waste (for all further trials instead of barley waste). For horse manure and wood digestion, dioxin (PCDD/F measurement) is additionally measured.

Test	Date	Substrat	Pyrolyse	
			Temperature (Average)	Retention time
			°C	min
1	18.02.2020	Horse manure	656	28
2	22.05.2020	Wood chips (reference)	735	28
3	23.06.2020	Coffee waste	739	28
4	21.09.2020	Milling waste (barley waste)	715	28
5	30.10.2020	Wood-Composting	762	17
6	01.12.2020	Bark	702	28
7	10.12.2020	Wood-Anaerobic digestion	713	28
8	15.12.2020	Horse manure (PCDD/F measurement)	770	28
9	10.03.2021	Wood-Anaerobic digestion (PCDD/F measurement)	765	28
10	07.05.2021	Milling waste (Wheat bran)	721	28



Results substrate analyses

Table 2: Properties of the substrates investigated (for further properties see Appendix 11.3).

Substrate	Ash content	Water content	Bulk density	Lower heating value (dry)	Energy density	C	H	N	S
	wt.-% _{dry}	wt.-%	kg/m ³	MJ/kg _{dry}	MJ/m ³	wt.-% _{dry}			
Wood chips	1.3	7.8	209	18.4	3'845	52.5	6.7	0.07	0.01
Horse manure	7.9	10.2	376	18.3	6'881	49.5	4.6	2.5	0.15
Barley waste	2.8	22.1	479	17.4	8'335	48.6	4.5	1.96	0.18
Wheat bran	7.2	9.9	365	17.5	6'388	47.4	4.8	2.8	0.2
Coffee waste	7.6	6.5	752	17.8	13'386	49.3	6.4	2.89	0.23
Bark	2.5	15.8	592	18.7	11'070	49.7	4.6	0.4	0.01
Wood-Anaerobic digestion	19.8	8.6	581	14.0	8'134	38.3	3.6	1.11	0.08
Wood-Composting	17.9	12.2	252	17.7	4'460	42.3	3.9	1.07	0.15



Exhaust emissions results

Table 3: Overview of exhaust emission results (measured values and OAPC limits apply to a residual oxygen content of 13%).

Substrat	CO	SO ₂	CH ₄	NO ₂	PCDD/F (incl. LQ)
	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	mg/Nm ³	ng/Nm ³
Wood chips	20	n.m.	< 1	86	n.m.
Horse manure	1	185	3	355	n.m.
Horse manure (PCDD/F measurement)	7	n.m.	7	480	0.21
Barley waste	3	n.m.	7	560	n.m.
Wheat bran	< 1	291	11	824	n.m.
Coffee waste	< 1	n.m.	10	610	n.m.
Bark	7	70	< 1	363	n.m.
Wood-Anaerobic digestion	< 1	170	5	504	n.m.
Holz-Anaerobic digestion (PCDD/F measurement)	22	201	3	497	0.38
Wood-Composting	50	88	< 1	326	n.m.

LQ: limite of quantification

n.m.: not measured or measured but unusable data. The SO₂ emission measurements should generally be taken with caution and limit value exceedances are not used as a hard exclusion criterion.

	Parameter meets all limits
	Parameter is < 50% above the limit value according to Art. 71 or 74 LRV
	Parameter is 50%-400% above the limit value according to Art. 71 or 74 LRV
	Parameter exceeds the limit value according to Art. 71 or 74 LRV by > 400%.



Results biochar properties

Table 4: Overview of biochar properties. The limit values for all EBC classes can be found in the appendix in section 11.1 on page 123. Explanations of the abbreviations used can be found in the list of abbreviations on page 7.

Substrate	C _{tot}	H/C _{org}	As	Pb	Cd	Cu	Ni	Hg	Zn	Cr	Σ16 EPA PAK (excl. LQ)	Σ8 EFSA PAK (excl. LQ)	Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthene	Chrom-VI	PCDD/F+PCB (incl. LQ)	Σ6 DIN-PCB (incl. LQ)
	wt.-%	mol/mol	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	ng/kg	µg/kg
Wood chips	89.5	0.18	< 0.8	< 2	< 0.2	6	4	<0.07	529	6	105	6.1	n.m.	< 0.5	n.m.	n.m.
Horse manure	73.1	0.24	< 0.8	< 2	< 0.2	45	335	<0.07	259	722	6.7	n.c.	n.m.	< 0.5	1.3	1.16
Barley waste	71.2	0.31	< 0.8	4	< 0.2	35	15	<0.07	134	28	0.7	n.c.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Wheat bran	68.1	0.17	< 0.8	< 2	< 0.2	42	3	<0.07	313	< 1	3.7	n.c.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Coffee waste	66.6	0.15	< 0.8	< 2	< 0.2	241	6	<0.07	63	2	0.2	n.c.	n.m.	< 0.5	n.m.	n.m.
Bark	81.9	0.21	< 0.8	3	< 0.2	14	6	<0.07	265	4	n.b.	n.c.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Wood-Anaerobic digestion	55.4	0.16	2.7	20	< 0.2	45	16	<0.07	183	52	n.b.	n.c.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Wood-Composting	63.5	0.13	3.3	8	< 0.2	93	18	<0.07	102	32	1.1	n.c.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.

n.c.: not calculable, as all values are below the limit of quantification (LQ).

n.m.: not measured

	Parameter meets the limit for all EBC classes
	Parameter does not meet the limit for EBC-Feed
	Parameter does not meet the limit for EBC-Feed/AgroBio
	Parameter does not meet the limit for EBC-Feed/AgroBio/Agro/Urban/Consumer material



Work Package 4: Pyrolysis trials on two commercial plants

In work package 4, three of the substrates previously tested in the laboratory rig were tested on a commercial pyrolysis plant (Pyreg plant in Basel) and a pilot plant (PyroFarm plant in Stettlen): (i) bark, (ii) wheat bran and (iii) coffee waste. The exhaust gases from the pyrolysis gas combustion and the composition of the biochar were measured.

Table 5: Overview of the tests carried out

Test	Date	Substrat	Plant
1	14.09.2021	Bark	Pyreg PX1500
2	17.09.2021	Wheat bran	PyroFarm P40
3	22.09.2021	Coffee waste	PyroFarm P40
4	23.09.2021	Bark	PyroFarm P40

Results exhaust gas measurements

Table 6: Results of flue gas measurements of bark, wheat bran and coffee waste measured in different plants

		Bark			Wheat bran		Coffee waste	
Parameter	Unit	PyroTube	Pyreg	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm
O ₂	Vol.-%	2.2	3.9	9.3	4.6	11.0	5.1	11.0
CO ₂	Vol.-%	16.9	16.8	11.0	13.8	8.8	13.3	8.8
NO _x	mg/Nm ³	363	240	572	824	1'103	610	917
SO ₂	mg/Nm ³	70	72	n.m.	291	240	n.m.	n.m.
CO	mg/Nm ³	7	5	5	< 1	11	< 1	10
CH ₄	mg/Nm ³	< 1	3	12	11	5	10	14
Particle matter	mg/Nm ³	n.m.	5.9	n.m.	n.m.	9.1	n.m.	23.1
PCDD/F	incl. LQ	ng/Nm ³	n.m.	0.00085	n.m.	0.00599	n.m.	0.00401
	excl. LQ	ng/Nm ³	n.m.	0.00002	n.m.	0.00242	n.m.	0.00269
Σ16 EPA PAH	incl. LQ	mg/Nm ³	n.m.	0.00013	n.m.	0.138	n.m.	0.871
	excl. LQ	mg/Nm ³	n.m.	0.00012	n.m.	0.138	n.m.	0.871

LQ: limit of quantification
n.m.: not measured



Results biochar

Table 7: Comparison of the properties of biochars produced in the different plants.

Parameter	Unit	Bark			Wheat bran		Coffee waste	
		PyroTube	Pyreg	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm	PyroTube	PyroFarm
C _{tot}	wt.-%	81.9	73.7	75.6	68.1	68.9	66.6	70.9
C _{org}	wt.-%	80.6	73.0	74.5	67.6	68.8	65.1	70.2
H	wt.-%	1.4	1.8	1.3	0.9	1	0.8	1.6
N	wt.-%	0.66	0.97	0.79	3.43	2.9	3.14	2.53
S	wt.-%	< 0.03	0.04	0.06	0.1	0.2	0.31	0.48
O	wt.-%	6.4	7.8	6.9	3.1	1.9	5.1	6.4
H/C _{org}	mol/mol	0.21	0.29	0.2	0.17	0.17	0.15	0.28
O/C	mol/mol	0.059	0.079	0.069	0.034	0.021	0.057	0.068
As	mg/kg	< 0.8	1	1	< 0.8	< 0.8	< 0.8	< 0.8
Pb	mg/kg	3	5	2	< 2	< 2	< 2	< 2
Cd	mg/kg	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2	< 0.2
Cu	mg/kg	14	21	20	42	55	241	188
Ni	mg/kg	6	13	11	3	10	6	8
Hg	mg/kg	< 0.07	< 0.07	0.12	< 0.07	< 0.07	< 0.07	< 0.07
Zn	mg/kg	265	271	229	313	308	63	60
Cr	mg/kg	4	16	16	< 1	7	2	12
Σ16 EPA PAH (excl. LQ)	mg/kg	n.c.	7	0.7	3.7	4.5	0.2	0.9
Σ8 EFSA PAH (excl. LQ)	mg/kg	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.	n.c.
Benzo[e]pyrene / Benzo[j]fluoranthene	mg/kg	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.	n.m.
Chromium (VI)	mg/kg	n.m.	< 1	< 1	n.m.	< 1	< 1	< 1

n.c.: not calculable, as all values are below the limit of quantification (LQ).

n.m.: not measured

	Parameter meets the limit for all EBC classes
	Parameter does not meet the limit for EBC-Feed
	Parameter does not meet the limit for EBC-Feed/AgroBio
	Parameter does not meet the limit for EBC-Feed/AgroBio/Agro/Urban/Consumer material



Bark

At 1'709 GWh/a, bark has the greatest additional usable energy potential of all the substrates investigated. Based on the flue gas emissions, it was determined that bark is a suitable feedstock. With regard to the composition of the biochar, a zinc content of over 200 mg/kg was found in the various biochars, which would make the biochar unsuitable for the EBC-Feed and EBC-AgroBio classes. One sample (bark pyreg) was found to contain PAHs, making it unsuitable for the EBC-AgroBio class. However, it is assumed that this value could be lowered by process adjustment. Bark, as a natural wood component, is permitted as a biochar input substrate under current legislation¹. However, for biochar production in today's commercially available plants, the bark has to be pre-dried (all plants) and slightly shredded (Pyreg and Biomacon), which is usually not a problem.

Wheat bran

In the experiments with wheat bran, NO_x and SO₂ emissions were higher compared to those with bark. Thus, primary and secondary measures might be needed to reduce NO_x emissions. Regarding the biochar, a high zinc content of more than 300 mg/kg was found in the different samples, which would make the biochar unsuitable for the EBC-Feed and EBC-AgroBio classes. The use of a wheat bran with a lower zinc concentration would make it possible to mitigate the problem of the high zinc content in the biochar. In addition, it is becoming increasingly difficult to market wheat bran as animal feed, as its starch content, among other things, is visibly reduced by optimised milling. Thus, its use as biochar is becoming more and more interesting, as demand from mills also shows. However, since wheat bran is not woody, it is not permitted as a biochar input substrate under current law³. For use on plants that are commercially available today, the bran must be pelletised for all the plants investigated, which could be realised comparatively cheaply at the point of origin at the grain mills.

Coffee waste

For coffee waste, NO_x emissions tended to be higher than for bark but lower than for wheat bran. Although these are likely to be below the limit value for plants < 2-3 MW_{th}, measures to reduce nitrogen oxides above 500 kW_{th} are recommended. In addition, adjustments could be made to reduce particulate emissions. And similarly, non-woody coffee waste is not permitted as a biochar input substrate under current law³. In addition, the increased copper content in the biochar is striking. Both samples yielded values that only allow an application as EBC Basic material. These increased values should be corroborated in follow-up tests, as this substrate would otherwise be highly interesting. Especially, because the substrate does not need to be prepared for pyrolysis in plants that are commercially available today, as it is already pelletised on site at most coffee roasting plants and is very dry.

³ This regulation was clearly confirmed again in April upon request to the Federal Office for Agriculture (FOAG). However, it is worth taking a look at the EU: here, biochars made from a wide range of organic materials of plant origin are permitted as soil additives in organic farming according to the Implementing Regulation (EU) 2019/2164 and in accordance with Regulation (EC) No. 834/2007 (EU-Bio, 2019). There are no restrictions regarding biomasses, provided they are not of animal origin (Schmidt et al. 2021). In Annex 6.7, the EBC positive list lists all biomasses permitted in the EU for the production of vegetable carbon. Wheat bran as well as coffee waste are permitted for all EBC products in the EU on the basis of this list.



Work Package 5: Life cycle assessment

The life cycle assessment analysis (LCA) quantified and compared the environmental impact of the current utilisation scenarios and the pyrolysis scenarios for each substrate. The environmental hotspots were identified in the life cycle assessments. The environmental impact of the current utilisation of the investigated feedstocks is mainly caused by the transport of the biomass, the utilisation processes themselves and the heavy metal input during a composting process.

In the pyrolysis scenarios, the environmental impacts arise primarily from the energy consumption for utilisation, the transport of the biomass, and the direct emissions during pyrolysis (CH₄ and dioxins). The credits granted for heat production and long-term C storage through the use of biochar compensate the environmental impacts in all scenarios and lead to environmental benefits for the pyrolysis scenarios, compared to current utilization scenarios.

In the case of wheat bran, the trade-offs between reduced CO₂ equivalent emissions and increased ecosystem impact should be further investigated. Further studies should also examine the influences of transport routes and means for all feedstocks, improve the modelling of the credits granted and integrate further positive environmental impacts of the use of biochar.

In the LCA carried out, the uncertainties of the data collected could change the differences between the individual results, but the general findings are judged to be stable.

Work Package 6: Techno-economic evaluation

In the techno-economic evaluation, the heat production costs for the pyrolysis plant of Biomacon in Flaach (400 kW thermal, Biomacon 400) and the pyrolysis plant of Pyreg in Basel (650 kW thermal, Pyreg 650) were determined for the allowed substrate, bark mulch, and a comprehensive **sensitivity analysis** was carried out with regard to substrate price, processing costs, plant-side investments, plant utilisation, biochar and heat sales price, and CO₂ compensation. The heat production costs are not determined as a measure of the techno-economic evaluation, but the annual profit before taxes (EBT) is determined and compared.



Results

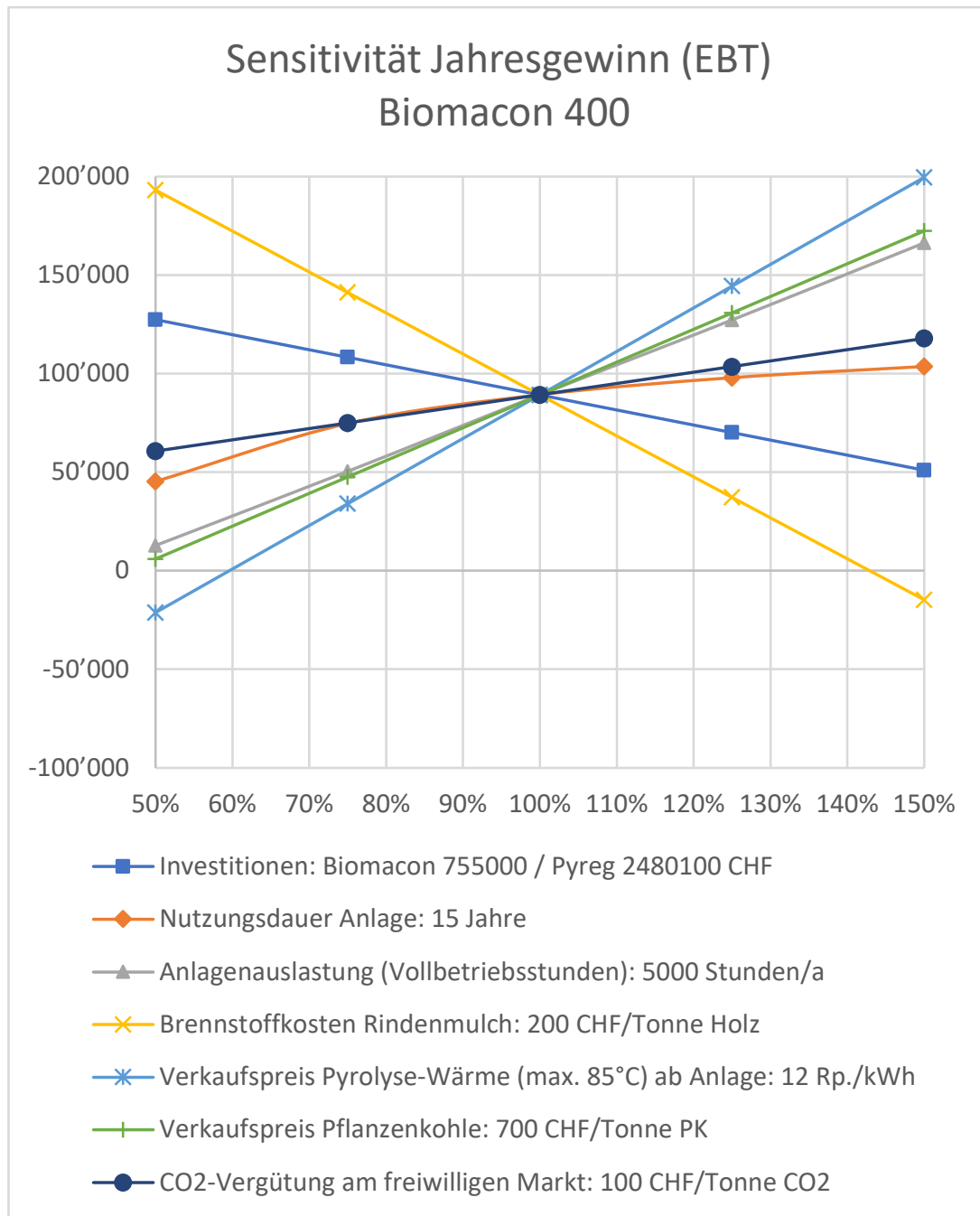


Figure 2: Result of the sensitivity calculation of the Biomacon 400 plant for six parameters. A percentage variation of the fuel costs and the heat sales price have the greatest effect on the annual profit. Surprisingly little sensitivity is shown for the CO₂ allowances. The values in the legend for the individual parameters represent 100% in each case.

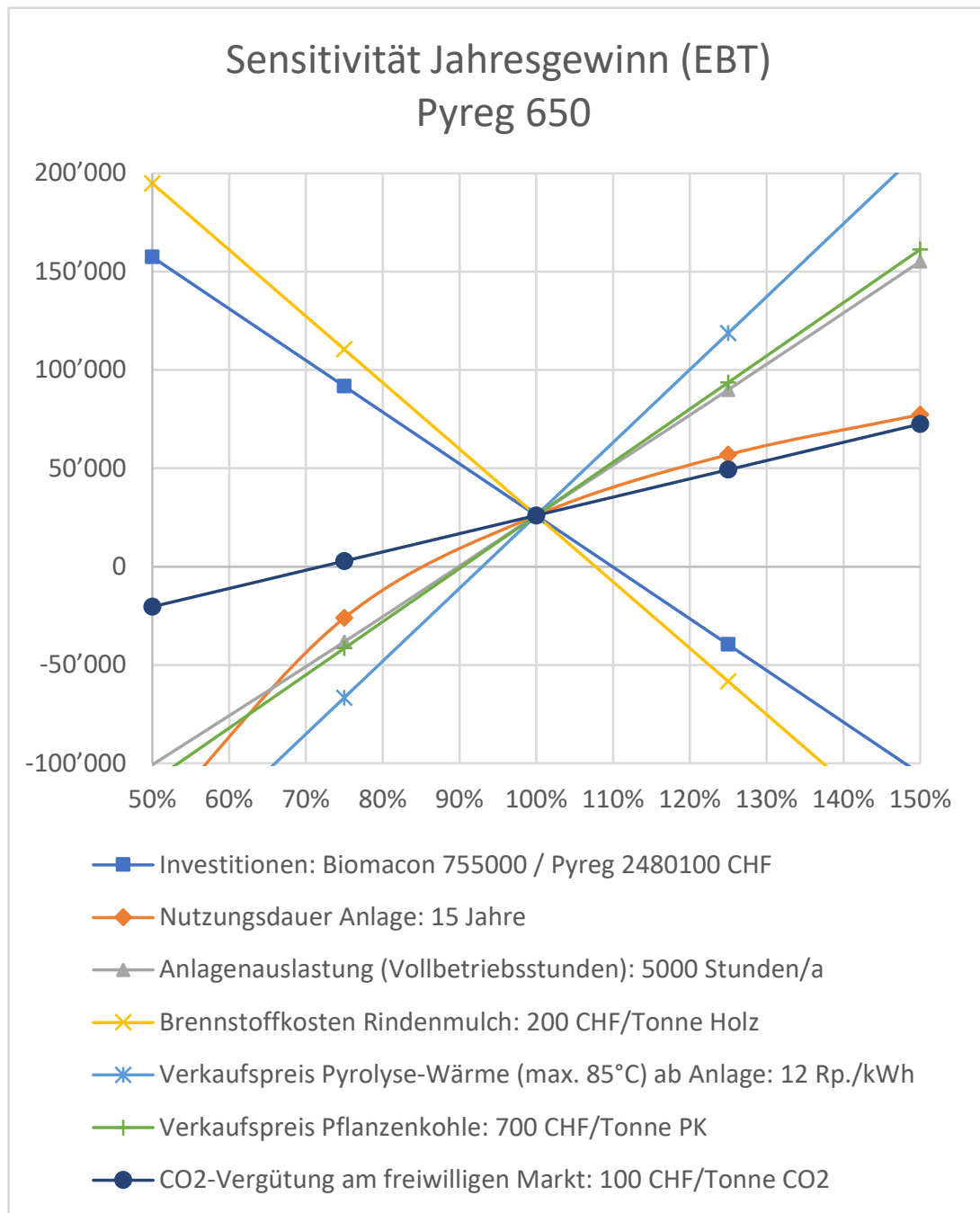


Figure 3: Result of the sensitivity calculation of the Pyreg 650 plant for six parameters. A percentage variation of the fuel costs and the heat sales price have the greatest effect on the annual profit. Surprisingly, the CO₂ allowances have little effect on the profit. The values in the legend for the individual parameters represent 100% in each case. In general, all parameters behave much more sensitively (steeper curves) than with the competing technology. Likewise, the break-even point (zero line) is undercut much faster, also because the reference scenario (all parameters at 100%) with an EBT of CHF 26,000 performs significantly worse than the competing technology (EBT of CHF 89,000).



Conclusion

Pyrolysis plants can already be operated economically today. However, special attention should be paid to the fuel costs and the heat sales price; a variation of these parameters has the greatest effect on the economic efficiency - for both technologies investigated. The sales price of the biochar and the plant utilisation (full operating hours) are also very decisive. Surprisingly, a possible CO₂ remuneration on the voluntary market has little effect on economic efficiency. Interestingly, the law of the "economy of scales" does not apply to the two technologies studied; the plant with the larger capacity clearly performed worse economically.

Conclusions

The field measurements have shown that the production of biochar from the substrates investigated is technically feasible and that the applicable limit values for exhaust gas emissions can be complied with for all substrates. In the case of nitrogen-rich substrates, the focus is on the correspondingly increased nitrogen oxide emissions. Suitable de-NO_x measures are required for large-scale plants. In the case of biochar, individual heavy metal contents are above the required limit values. The measured values must be corroborated with further measurements. In particular, the heavy metal contents of the source substrates are subject to wide variation depending on the source and could not be adequately quantified within the scope of this study. In the case of untreated substrates that already enter the soil today (via composting, fermentation or feeding), it must be taken into account that during pyrolysis the heavy metals are concentrated by a factor of up to 3.5, due to the process. On the other hand, biochar is introduced into the soil in much lower doses and in much lower cumulative total amounts over the years compared to compost or digestate. The cumulative total load of pollutants into the soil would therefore have to be investigated more closely and serve as a basis for assessment.

The fact that only 50% of an exergy-rich energy source is still used for energy is still often a main argument used by energy experts against biochar production from wood - especially as long as fossil fuels are still used and could be replaced by wood. In fact, in such a comparison, the CO₂ balance of wood pyrolysis and total wood combustion is identical while the solar energy stored in the wood, e.g. for winter, is less. However, a) the additional ecological benefit of coal in the soil and b) the more expensive, higher-emission wood energy production - which is severely limited in terms of overall potential - compared to the new renewables, increasingly argue in favour of the material use of wood. The wood of the future is no longer primarily an energy resource but a valuable material resource.



Take-home messages

- Die Pyrolysetechnik zur Herstellung von Pflanzenkohle ist inzwischen ausgereift und im Übergang zur Serienproduktion. Für die Schweiz ist Pflanzenkohle seit Juni 2016 in der Düngemittelverordnung als Bodenzuschlagsstoff zugelassen. Seit 1. Januar 2018 gilt diese Zulassung auch für den Biolandbau. Seither steigt die Nachfrage nach Pflanzenkohle stark. Als Ausgangsmaterial ist bis heute (2022) aber nur naturbelassenes Holz erlaubt.
- Substrate, die dem Holz am verwandtesten sind, sind für die Verkohlung am besten geeignet (hoher Kohlenstoffgehalt, geringe Stickstoffgehalte, relativ trocken). In Feldversuchen wurden folgende drei Substrate getestet: Rinde, Weizenkleie und Kaffeeabfälle. Rinde ist dabei das interessanteste Substrat, weil sie einerseits fast die Hälfte des zusätzlichen Energiepotenzials und der Pflanzenkohleproduktion ausmachen könnte. Andererseits weil sie bezüglich heiklen Inhaltsstoffen wie Schwefel und Chlor unkritisch ist.
- Die modellierte Ökobilanz zeigt, dass sich die Umsetzung der Pyrolysevariante bei allen Substraten im Vergleich zur heutigen Verwertung lohnen würde.
- Pyrolyseanlagen sind bereits heute wirtschaftlich zu betreiben. Doch gilt den Brennstoffkosten und dem Wärme-Verkaufspreis ein besonderes Augenmerk; eine Variation dieser Parameter haben den grössten Effekt auf die Wirtschaftlichkeit. Auch sehr entscheidend sind der Verkaufspreis der Pflanzenkohle und die Anlagenauslastung (Vollbetriebsstunden)
- Bei naturbelassenen Substraten, welche heute bereits in den Boden gelangen (über Kompostierung, Vergärung oder Fütterung), muss bedacht werden, dass bei der Pyrolyse die Schwermetalle prozessbedingt bis zu Faktor 3.5 aufkonzentriert werden. Hingegen wird Pflanzenkohle in viel geringeren Dosen und über die Jahre kumuliert in noch viel geringeren Gesamtmengen im Vergleich zu Kompost oder Gärgut in den Boden eingebracht. Die kumulierten Gesamtfracht an Schadstoffen in den Boden müsste daher näher untersucht werden und als Beurteilungsgrundlage dienen.



Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Résumé.....	16
Summary	29
Take-home messages	42
Inhaltsverzeichnis	43
Abkürzungsverzeichnis	46
1 Einleitung	47
1.1 Ausgangslage und Motivation	47
1.2 Projektplan und -ziele	47
2 AP 1: Bewertung des Biomassepotenzials für die Pyrolyse (Meilenstein 1)	50
2.1 Vorgehen und Methode	50
2.1.1 Grobselektion der Substrate: Ausschlusskriterien.....	50
2.1.2 Feinselektion der Substrate: Kriterienerfüllung	50
2.2 Ergebnisse und Diskussion	51
2.2.1 Ergebnisse der Grobselektion	51
2.2.2 Ergebnisse der Feinselektion	53
3 AP 2 und 3: Vorbehandlung der Substrate und Pyrolyseversuche auf einer Laboranlage 56	
3.1 Vorgehen und Methode	56
3.1.1 Beschreibung der Laboranlage der FHNW	56
3.1.2 Durchführung Laborversuche	57
3.1.3 Aufbereitung der Substrate.....	57
3.1.4 Analysen der Substrate	57
3.1.5 Analysen von Abgas der Pyrolysegasverbrennung.....	57
3.1.6 Analysen der Pflanzenkohle	58
3.2 Ergebnisse und Diskussion	59
3.2.1 Beschreibung der Substrate	59
3.2.2 Analysen der Substrate	61
3.2.3 Abgasemissionen der Pyrolysegasverbrennung	61
3.2.4 PCDD/F-Bildung (Dioxinbildung).....	62
3.2.5 Eigenschaften der Pflanzenkohle	63
3.3 Bewertung der untersuchten Substrate	65
4 AP 4: Pyrolyseversuche auf zwei kommerzielle Anlagen	69
4.1 Vorgehen und Methode	69
4.1.1 Beschreibung der kontinuierliche Industrie-Anlage der Firma Pyreg GmbH	69
4.1.2 Beschreibung der Batch-Anlage PyroFarm der Firma Kaskad-E GmbH	70



4.1.3	Durchführung Feldversuche	72
4.1.4	Abgasmessung der Pyrolysegasverbrennung.....	73
4.1.5	Analysen der Pflanzenkohle	73
4.2	Ergebnisse und Diskussion	74
4.2.1	Abgasemissionen bei dem Feldversuch.....	74
4.2.2	Eigenschaften der Pflanzenkohle	81
4.3	Vergleich und Beurteilung der Ergebnisse der verschiedenen Anlagen	89
4.3.1	Vergleich der Abgasemissionen	89
4.3.2	Vergleich der Eigenschaften der Pflanzenkohle.....	91
4.4	Fazit	92
5	AP 5: Ökobilanzierung	94
5.1	Einleitung	94
5.2	Methodik	95
5.2.1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	95
5.2.2	Erstellen der Sachbilanz: Datenerhebung, Modellierung	95
5.2.3	Wirkungsabschätzung: Bewerten der Umweltauswirkung	95
5.2.4	Auswertung: Interpretation und Diskussion	95
5.3	Ziel und Untersuchungsrahmen	97
5.3.1	Ziel	97
5.3.2	Funktionelle Einheit und Systemgrenzen	97
5.3.3	Systemgrenzen.....	97
5.3.4	Systemerweiterungen und Szenarien	100
5.3.5	Kohlenstoffsенke (C-Senke).....	101
5.4	Sachbilanz	102
5.4.1	Heutige Verwertungspfade	102
5.4.2	Pyrolysepfad	102
5.4.3	Transporte	102
5.5	Wirkungsabschätzung	103
5.5.1	Vergleich heutiger Verwertungspfade mit der Pyrolysevariante	103
5.6	Beurteilung der Ergebnisse und Diskussion.....	105
5.6.1	Vergleich der heutigen Verwertung mit den Pyrolysevarianten	105
5.6.2	Gutschriften	108
5.6.3	Pflanzenkohle	108
5.6.4	Sachbilanz	108
5.7	Fazit	109
6	AP 6: Techno-ökonomische Bewertung	110
6.1	Wirtschaftlichkeitsparameter	110
6.1.1	Investitionen / Annuität	110
6.1.2	Energiepreise.....	110



6.1.3	Erlöse.....	111
6.1.4	Förderungen	111
6.1.5	Betrieb, Unterhalt und Qualitätskontrolle.....	111
6.2	Ergebnisse Wirtschaftlichkeit.....	112
6.2.1	Jahresgewinn vor Steuern.....	112
6.2.2	Sensitivität	114
6.2.3	Fazit	114
6.3	Vermarktungsszenarien Pflanzekohle generell	117
7	Schlussfolgerungen und Fazit	119
8	Ausblick und zukünftige Umsetzung	119
9	Nationale und internationale Zusammenarbeit	120
10	Literaturverzeichnis	121
11	Anhang	123
11.1	Grenzwerte Pflanzekohle: European Biochar Certificate (EBC)	123
11.2	Messverfahren	124
11.3	Weitere Messergebnisse	124
11.4	Wirkungsabschätzungsmethoden	125
11.4.1	GWP20/100	125
11.4.2	Umweltbelastungspunkte (Methode der ökologischen Knappheit)	125
11.5	Sachbilanz	127
11.5.1	Pyrolyse-Anlagen	127
11.5.2	Heutige Verwertungspfade	128
11.5.3	Pyrolyse-Szenarien	131
11.6	Dioxin-Katalysatoren	134
11.7	EBC-Positivliste zulässiger Biomassen zur Herstellung von Pflanzekohlen	135
11.8	Laborergebnisse Eurofins.....	138



Abkürzungsverzeichnis

BG	Bestimmungsgrenze
C, H, N, S	Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel
CO	Kohlenmonoxid
DIN	Deutsch Industrienorm
EBC	European Biochar Certificate
EBT	Earnings Before Taxes (Jahresgewinn vor Steuern)
EFSA	European Food Safety Authority (Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit)
EPA	Environmental Protection Agency (die amerikanische Umweltbehörde)
FHNW	Fachhochschule Nordwestschweiz
FLOX	Flammenlose Oxidation
GC-HRMS	Gaschromatographie high-resolution Massenspektrometrie
GWh	Gigawattstunden = 1'000'000 Kilowattstunden
GWP	Global Warming Potential
ISO	International Standardization Organization
I-TEQ	Toxizitätsäquivalent
KliK	Stiftung Klimaschutz und CO ₂ -Kompensation
KVA	Kehrrichtverbrennungsanlage
LRV	Luftreinhalteverordnung
Ma.-%wf	Massenprozent, wasserfrei
NDIR	Nichtdispersive Infrarot-Photometrie
Nm ³	Normkubikmeter
NO _x	Stickoxide
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane
PF	PyroFarm
PK	Pflanzenkohle
PM	Particulate Matters (Feinstaub)
PR	Pyreg
PT	PyroTube
PVC	Polyvinylchlorid
TS	Trockensubstanz
UBP	Umweltbelastungspunkt
VVEA	Verordnung über die Vermeidung und die Entsorgung von Abfällen