



Schlussbericht vom 28. Dezember 2022

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.

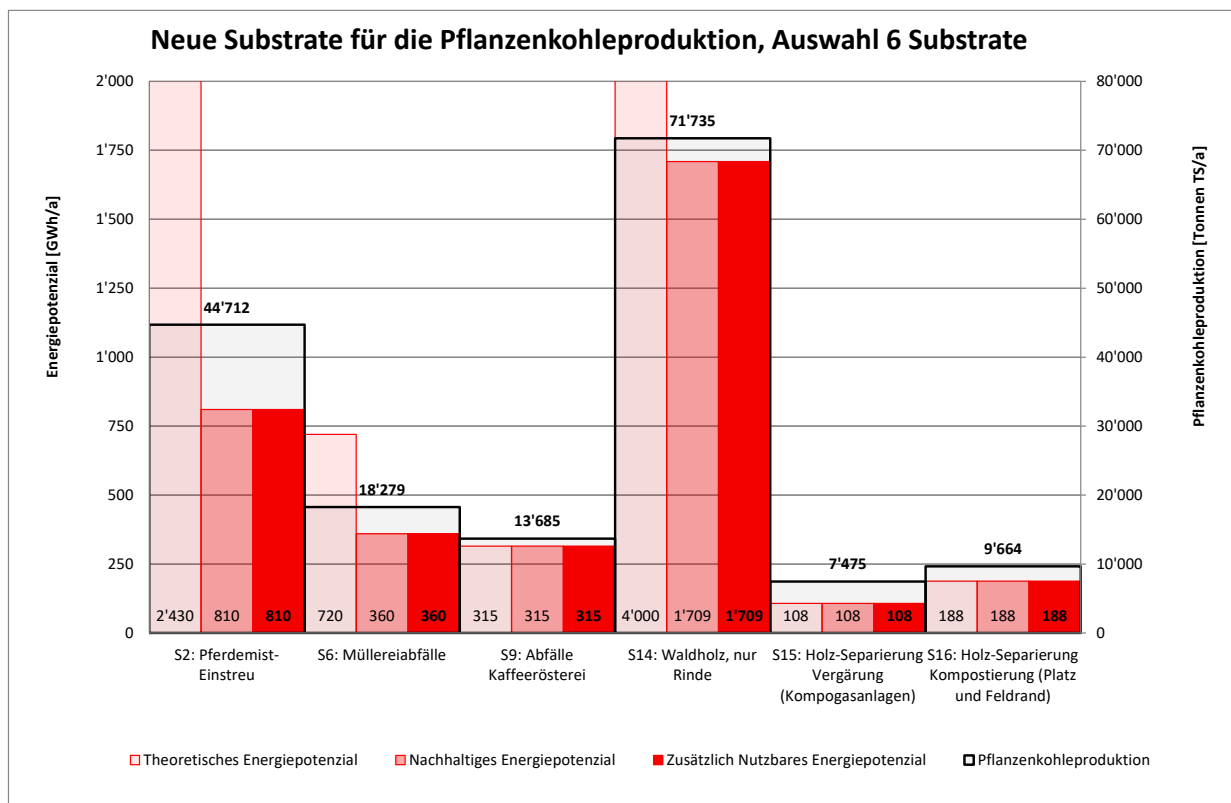


Abbildung 1: Energie- und Pflanzenkohlepotenziale der sechs untersuchten Substrate nach der Feinselektion. Der schwarz umrandete Balken «Pflanzenkohleproduktion» würde erzielt, wenn das gesamte Substrat des zusätzlich nutzbaren Energiepotenzial zu Pflanzenkohle umgewandelt würde (23% bzgl. dem TS-Massengehalt, 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 Pflanzenkohle 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		Kaffeeabfälle	
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.	9.1	n.g.	23.1
PCDD/F	inkl. BG	ng/Nm ³	n.g.	0.00085	n.g.	0.00599	n.g.	0.00401
	exkl. BG	ng/Nm ³	n.g.	0.00002	n.g.	0.00242	n.g.	0.00269
Σ16 EPA PAK	inkl. BG	mg/Nm ³	n.g.	0.00013	n.g.	0.138	n.g.	0.871
	exkl. BG	mg/Nm ³	n.g.	0.00012	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]fluoranthren	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

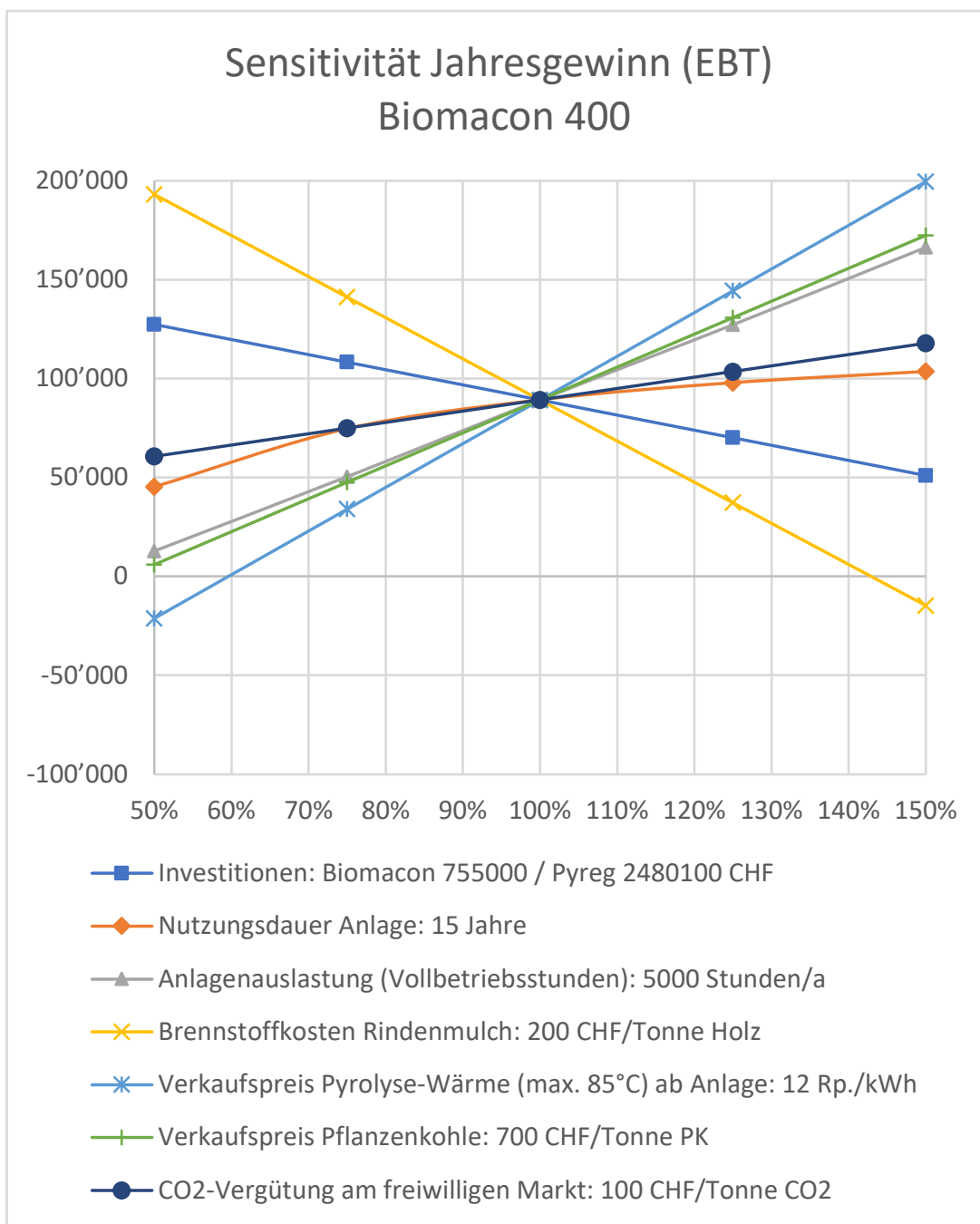


Abbildung 2: Ergebnis der Sensitivitätsberechnung der Biomacon 400 Anlage für sechs Parameter. Eine prozentuale Variation der Brennstoffkosten und des Wärme-Verkaufspreises haben den grössten Effekt auf den Jahresgewinn. Erstaunlich wenig sensitiv wirken die CO₂-Vergütungen auf den Gewinn. Die Werte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

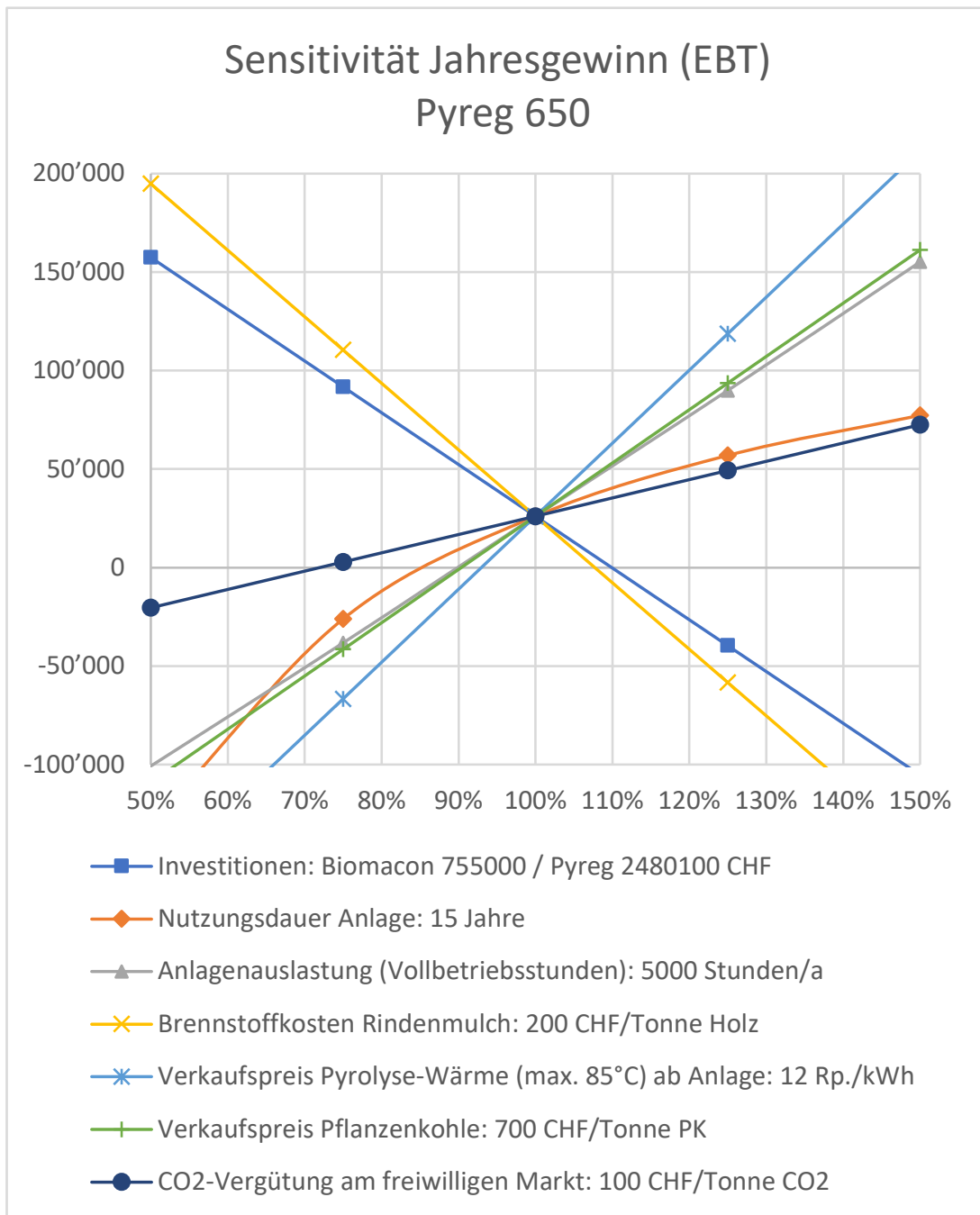


Abbildung 3: Ergebnis der Sensitivitätsberechnung der Pyreg 650 Anlage für sechs Parameter. Eine prozentuale Variation der Brennstoffkosten und des Wärme-Verkaufspreises haben den grössten Effekt auf den Jahresgewinn. Erstaunlich wenig sensitiv wirken die CO2-Vergütungen auf den Gewinn. Die Werte in 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.

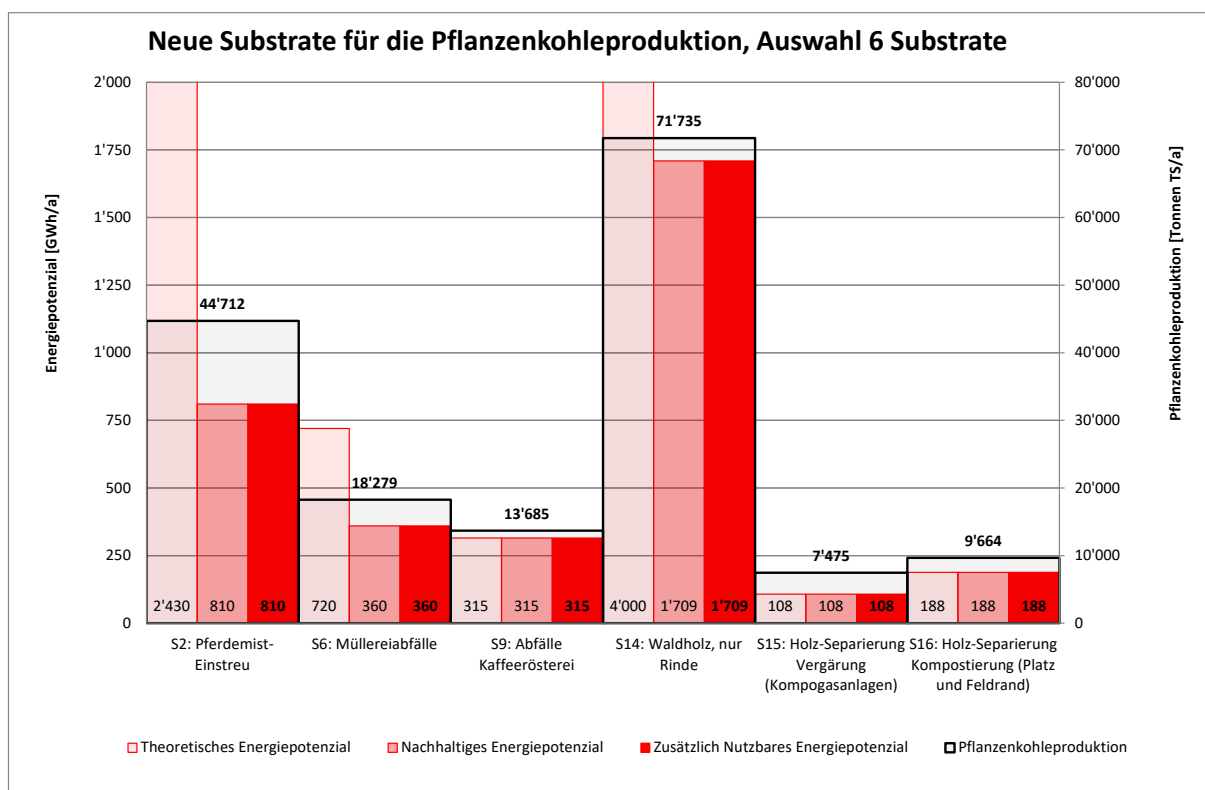


Figure 1: Potentiels d'énergie et de biochar des six substrats étudiés après la sélection fine. Le cadre noir "production de biochar" représente la production théorique si le potentiel énergétique supplémentaire utilisable était transformé en biochar (23% par rapport à la teneur en masse de matière sèche, 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]fluoranthén	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

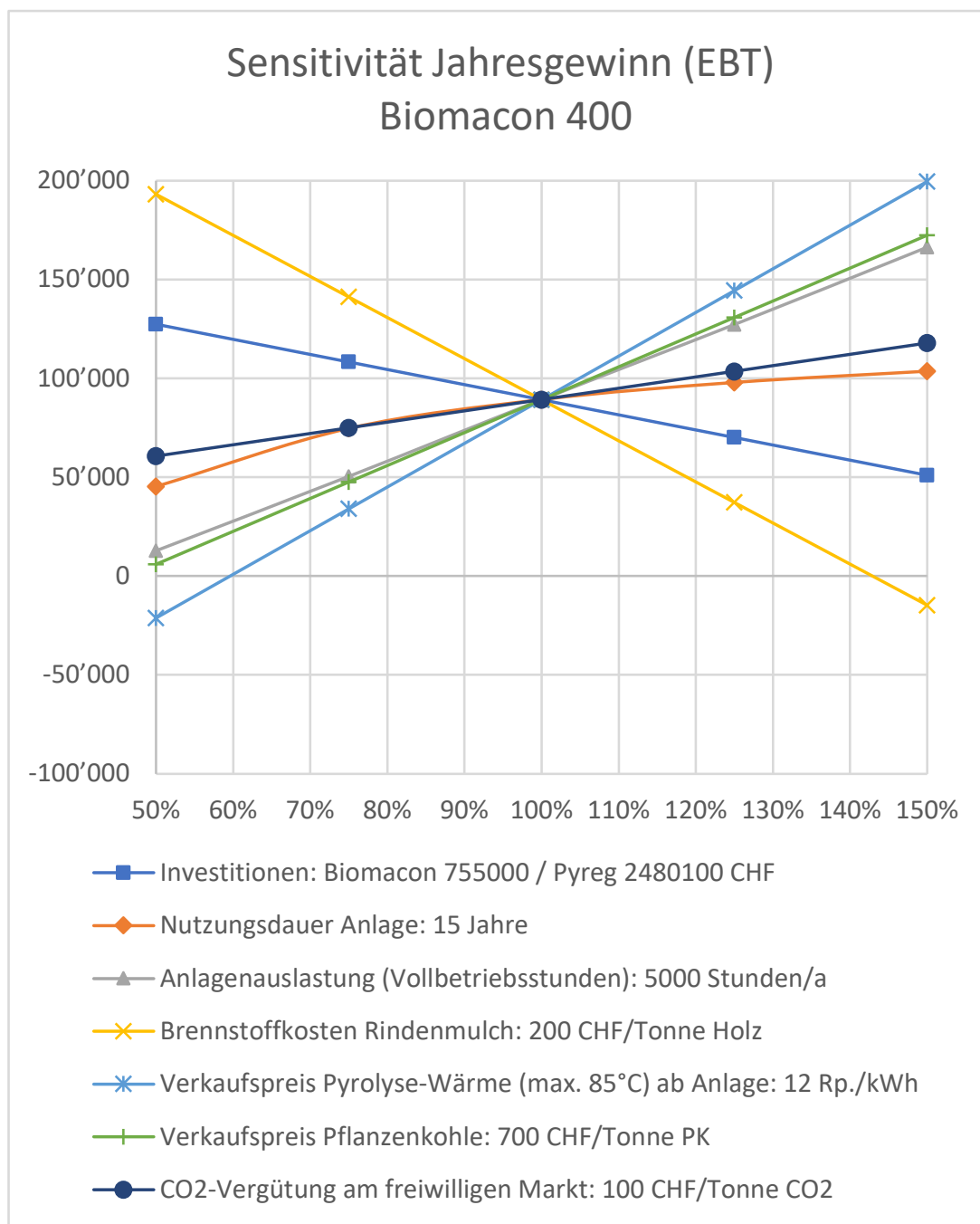


Figure 2: Résultat du calcul de sensibilité de l'installation Biomacon 400 pour six paramètres. Une variation en pourcentage des coûts des combustibles et du prix de vente de la chaleur a l'effet le plus important sur le bénéfice annuel. Les compensations de CO₂ ont un effet étonnamment peu sensible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

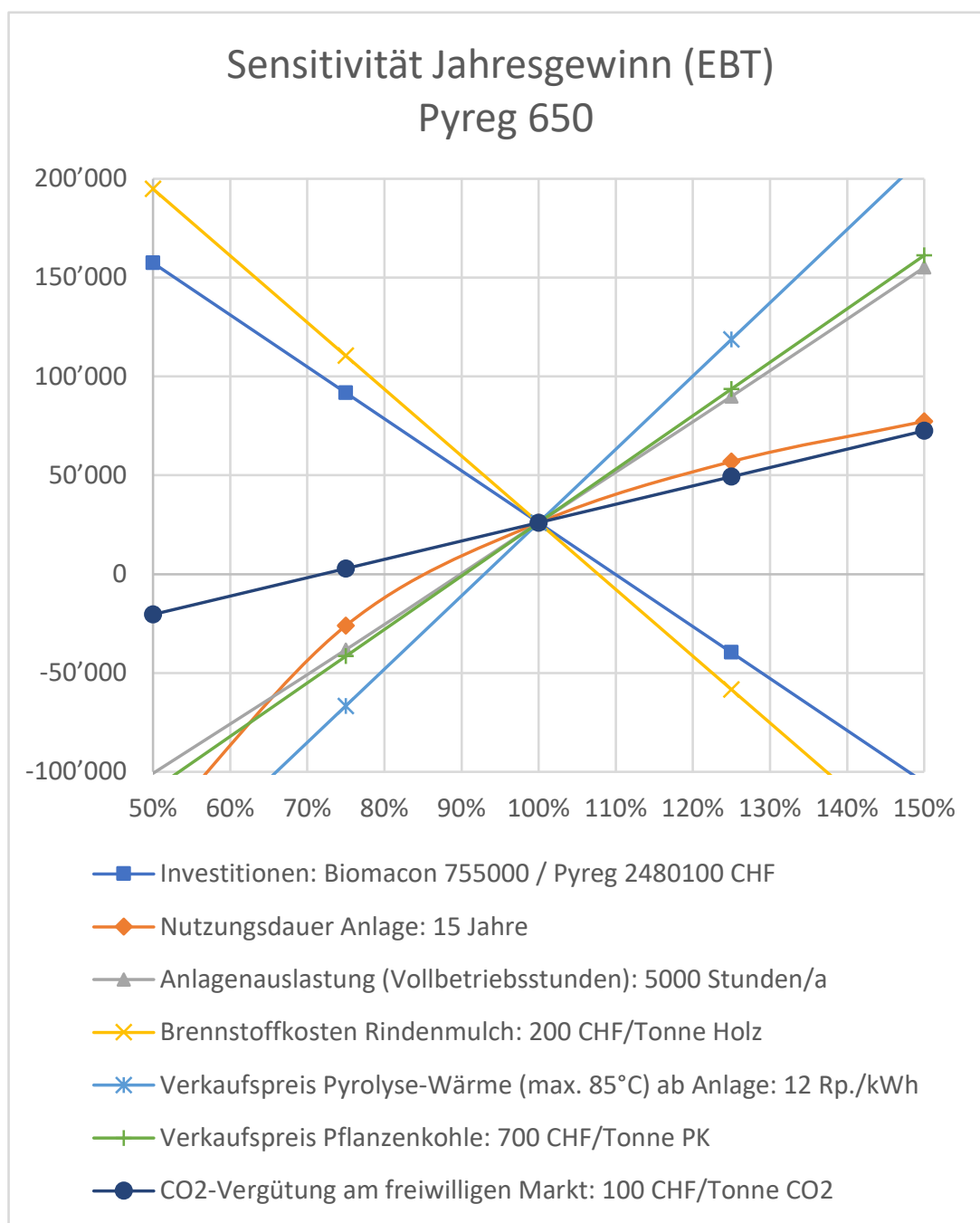


Figure 3: Résultat du calcul de sensibilité de l'installation Pyreg 650 pour six paramètres. Une variation en pourcentage des coûts de combustible et du prix de vente de la chaleur a l'effet le plus important sur le bénéfice annuel. Les compensations de CO₂ ont un effet étonnamment peu sensible sur le 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.

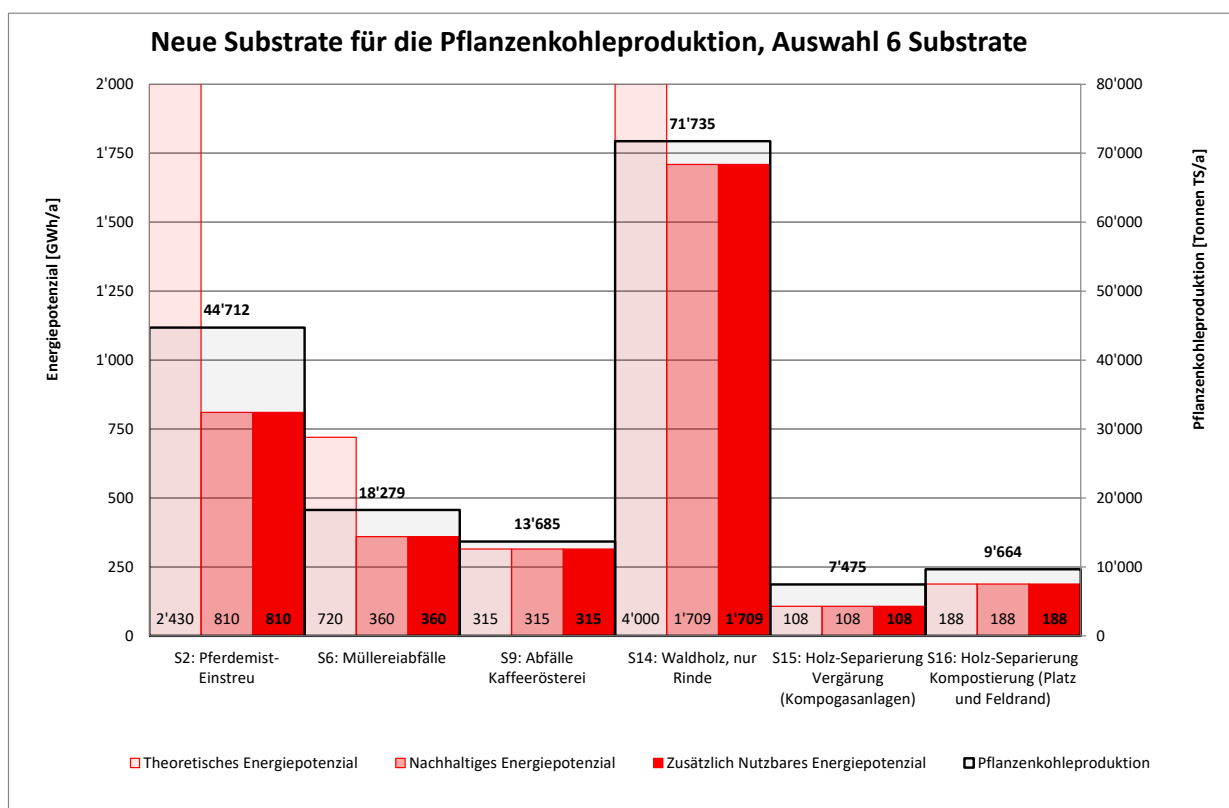


Figure 1: Energy and biochar potentials of the six substrates investigated after fine selection. The bar with the black border "biochar production" would be achieved if the entire substrate of the additional usable energy potential were converted to biochar (23% with regard to the dry matter mass content, 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

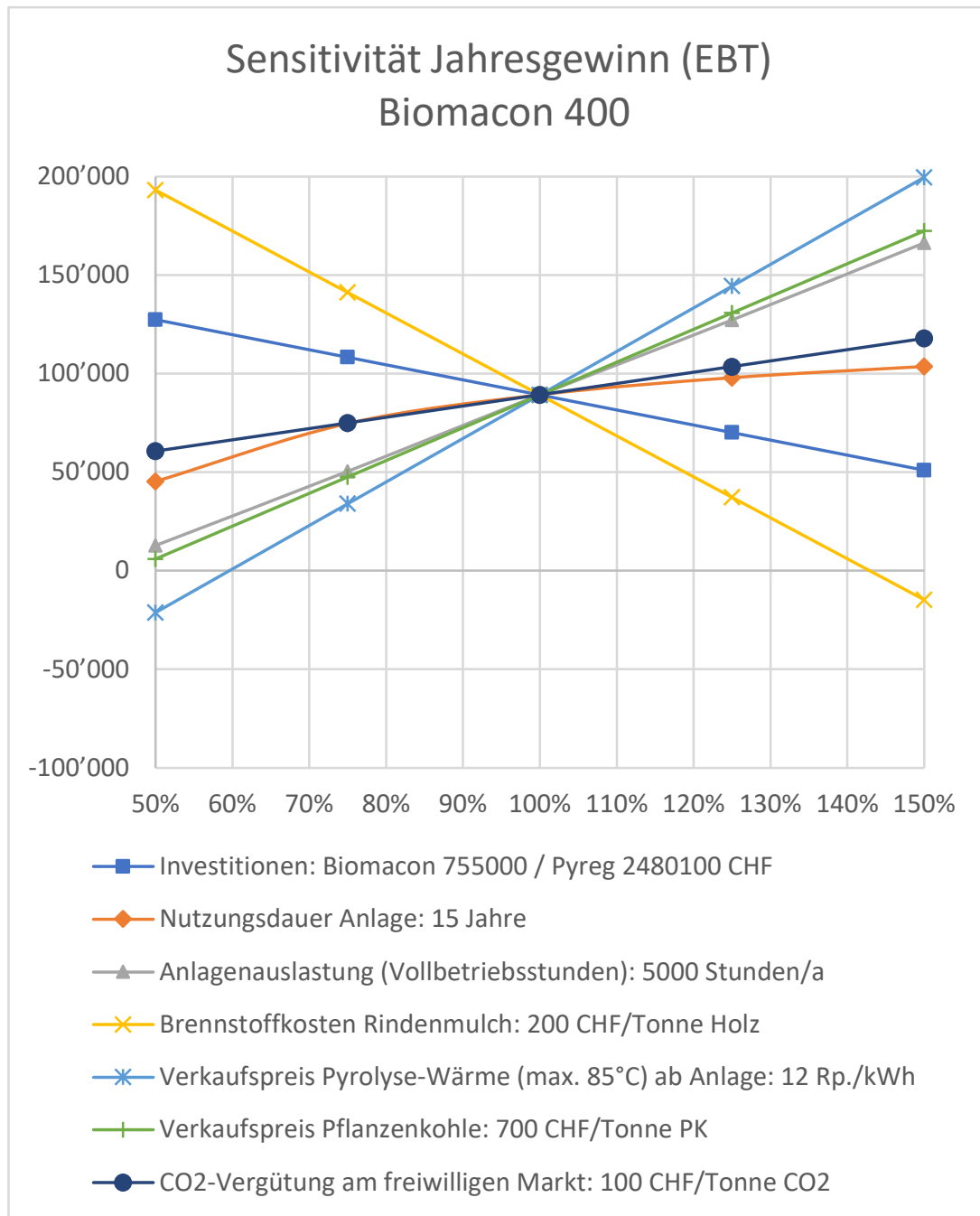


Figure 2: Result of the sensitivity calculation of the Biomacon 400 plant for six parameters. A percentage variation of the fuel costs and the heat sales price have the greatest effect on the annual profit. Surprisingly little sensitivity is shown for the CO₂ allowances. The values in the legend for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

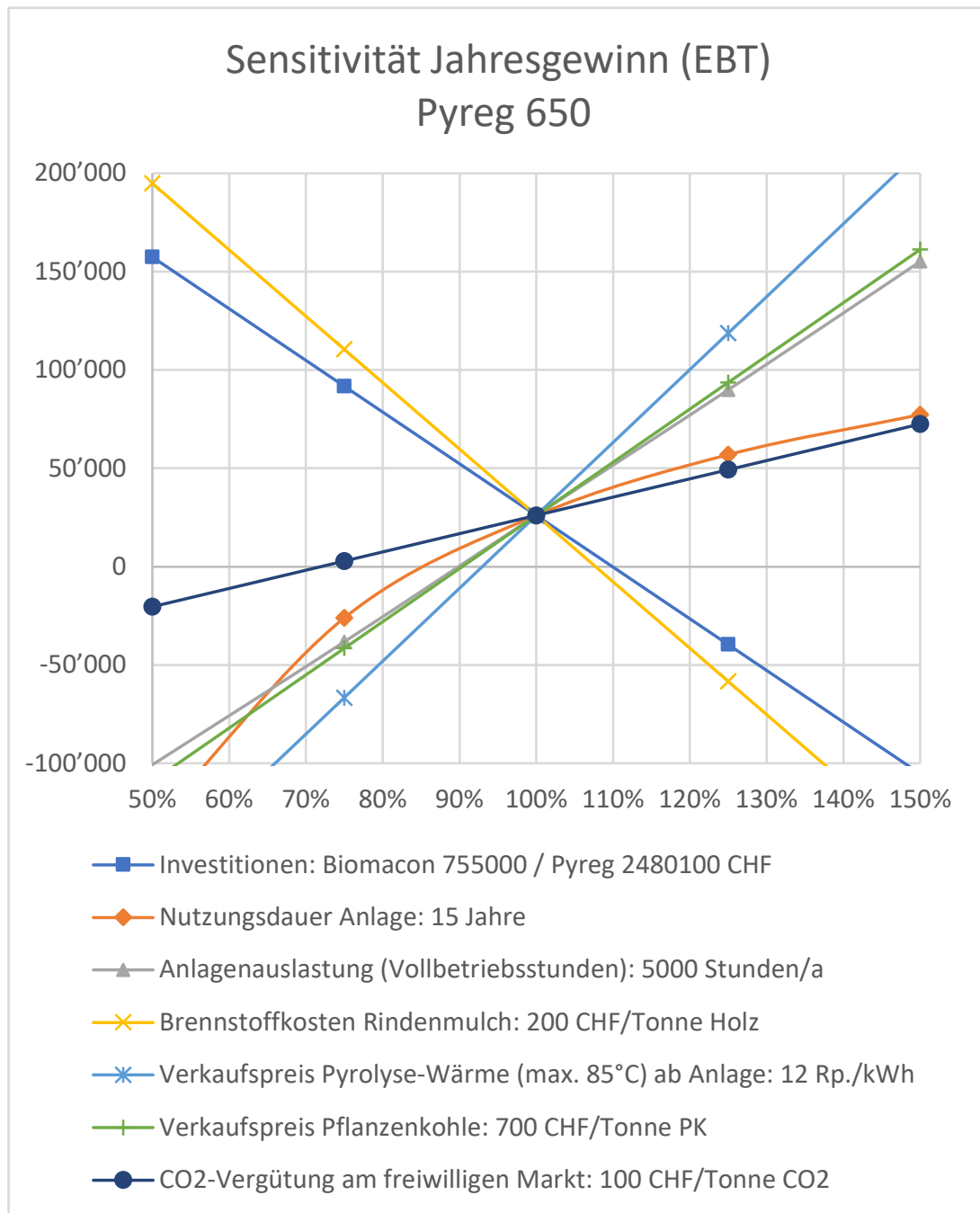


Figure 3: Result of the sensitivity calculation of the Pyreg 650 plant for six parameters. A percentage variation of the fuel costs and the heat sales price have the greatest effect on the annual profit. Surprisingly, the CO₂ allowances have little effect on the profit. The values in the legend for the 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



1 Einleitung

1.1 Ausgangslage und Motivation

Die Pyrolysetechnik zur Herstellung von Pflanzenkohle ist inzwischen ausgereift und im Übergang zur Serienproduktion. Europaweit sind ca. 10 Anbieter von Anlagen am Markt (Stand 2020⁴). 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 erlaubt⁵.

Im Rahmen des Projekts werden weitere (nicht-holzige, aschereiche) Substrate fundiert untersucht, die sich für konventionelle Bioenergieanlagen nicht eignen, sich hingegen 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.

1.2 Projektplan und -ziele

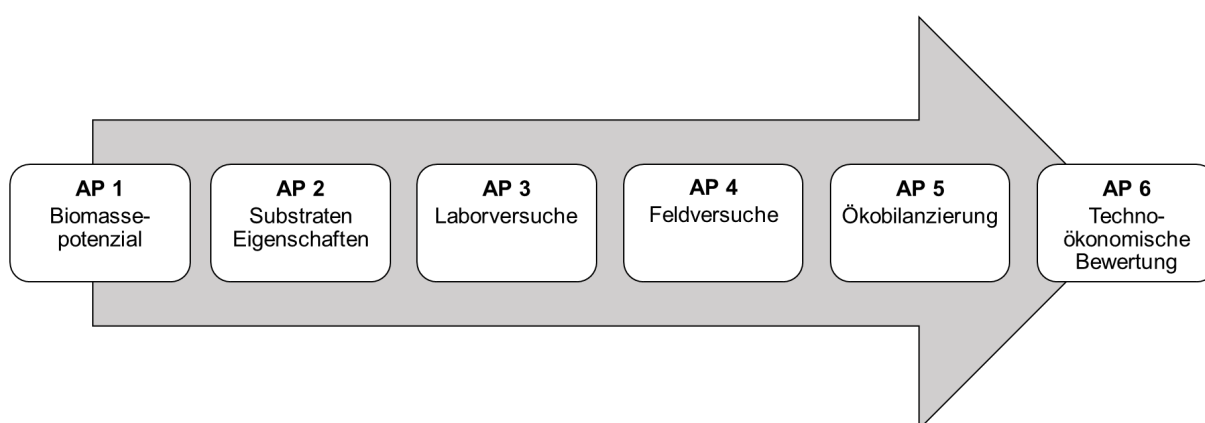


Abbildung 1: Grafischer Überblick der verschiedenen Arbeitspakete des Projekts

Arbeitspaket 1 (AP 1): Bewertung des Biomassepotenzials für die Pyrolyse

Die Literaturrecherche hat gezeigt, dass keine Studien zum Biomassepotenzial hinsichtlich der Verkohlung zur Pflanzenkohleproduktion für die Bodenanwendung und die Fütterung vorliegen (Stand 2020). Die vorhandenen allgemeinen Biomassepotenzialstudien müssen daher mit dem «Pyrolyse-Filter» bearbeitet werden. Dabei werden ausschliesslich Substrate berücksichtigt, die heute nicht energetisch genutzt werden (können) und durch die Pyrolyse künftig zu rund 50% energetisch genutzt werden könnten. Zudem müssen die Substrate möglichst naturbelassen sein, weshalb z.B.

⁴ Aktuelle Liste aller Pflanzenkohle-Hersteller, -Verarbeiter und Händler: www.european-biochar.org/de/companies

⁵ www.charnet.ch



Klärschlamm nicht in Frage kommt. Alle fraglichen Substrate werden einer Elementaranalyse unterzogen, um verunreinigte Substrate mit Sicherheit zu erkennen. Zusätzlich werden auch die verbrennungsrelevanten Eigenschaften (Heizwert, Wassergehalt, etc.) bestimmt. Dabei werden von naturgemäss variablen Substraten drei Stichproben von ganz unterschiedlicher Herkunft genommen, um die Variabilität des Substrattyps zu bestimmen.

Arbeitspaket 2 (AP 2): Beurteilung der erforderlichen Vorbehandlung von Substraten

In der Praxis treten bei der Biomasseverwertung in der Logistik und Qualitätsgarantie (Homogenisierung, Transport, Lagerung und Einförderung) meist mehr Probleme auf als beim eigentlichen thermischen Prozess. Dies gilt bei den automatisierten Pyrolyseanlagen gleichermassen wie bei Holzfeuerungen. Daher ist es für eine praxistaugliche Anwendung entscheidend, dass der inhomogene Naturbrennstoff einen substratspezifischen Standardisierungsprozess durchläuft. Dies kann Siebung, Trocknung oder Pelletierung beinhalten. Für den letzteren Prozess, der vor allem beim Pferdemit unverzichtbar sein dürfte, wurde mit der Firma Bioburn ein Partner gewonnen, der diesen Prozess bereits beherrscht. Bei allen Standardisierungsprozessen wird ausschliesslich auf erprobte Technik zurückgegriffen. Neuentwicklungen sind im Rahmen dieses Projekts nicht geplant. Um die nötigen Aufarbeitungsschritte zu begründen, werden folgende Analysen für jedes Substrat durchgeführt: Brennwert, Spurenelemente, physikalische Parameter.

Arbeitspaket 3 (AP 3): Pyrolyseversuche auf eine Laboranlage

Die Substrate aus Arbeitspaketen 1 und 2 müssen bezüglich Eignung zur Pflanzenkohle-Pyrolyse näher untersucht werden. Dies geschieht in einem ersten Schritt auf einer Laboranlage der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW), da hier die Prozessbedingungen einfach eingestellt werden können, weniger Substrat nötig ist und mehr Analyse-Möglichkeiten für weniger Aufwand verfügbar sind. In dieser kontinuierlichen Anlage können Pyrolyse- und Verbrennungsversuche bei ca. 5 kW thermische Leistung durchgeführt werden.

Bei den Laborversuchen werden (i) die Pyrolyseparameter (Temperatur, Verweilzeit) (ii) die Zusammensetzung des Abgases (CO, PM, NOx) und (iii) die Qualität der Pflanzenkohle nach dem European Biochar Certificate (EBC) untersucht.

Arbeitspaket 4 (AP 4): Pyrolyseversuche auf zwei kommerzielle Anlagen

Um die Ergebnisse der Labormessung zu erhärten und die Praxistauglichkeit der Substrate nachzuweisen, werden Pyrolyseversuche auf zwei kommerzielle Anlagen gefahren. Die Feldversuche werden auf der kontinuierlichen Pyrolyseanlage der Industrielle Werke Basel (IWB) und auf einer Batch-Feldtest-Anlage „PyroFarm“ von Kaskad-E in Stettlen (BE) durchgeführt.

Bei den Feldversuchen werden (i) die Zusammensetzung des Abgases (CO, PM, NOx) und (ii) die Qualität der Pflanzenkohle nach EBC untersucht.

Arbeitspaket 5 (AP 5): Ökobilanz

Der Pyrolysevorteil der evaluierten Substrate muss aufgezeigt werden. Als Methode zur Umsetzung dieser komplexen Aufgabe wird eine Ökobilanzierung gewählt. Diese zeigt die Umweltauswirkungen pro verwertete Biomassenmenge. Für jedes gewählte Substrat werden die Umweltbelastungen des heutigen Entsorgungs-/Verwertungspfades mit denjenigen der vorgesehenen Pyrolyse verglichen. Die Auswirkungen des Transports, der Aufbereitung (u. a. Pelletierung) und der Verwertung des Materials werden berücksichtigt. Die durch den Einsatz der Pyrolyseprodukte (Pyrolysegas, Pflanzenkohle) vermiedenen Belastungen werden wo möglich ebenfalls berücksichtigt, z. B. der ersetzten Wärme und der Kohlenstoffspeicherung. Die Ökobilanzierung wird anhand verschiedener Wirkungskategorien durchgeführt.



Arbeitspaket 6 (AP 6): Techno-ökonomische Bewertung

Bei der techno-ökonomischen Bewertung werden die Investitionskosten sowie die Kosten für Betrieb und Unterhalt von zwei kommerziell verfügbaren Pyrolyse-Technologien ermittelt. Die Genauigkeit beträgt dabei +25/-0%. Die Ermittlung der Investitionen erfolgt mit Einheits- und Elementpreisen, abgeleitet aus Erfahrungswerten. Dabei werden die Peripherieanlagen (Brennstoffeinbringung, Kohleaustrag und Kamin) eingerechnet. Die Kosten für die Wärmeverteilung (Speicher, Expansionsgefäß, Wärmeverteilkasten, Nahwärmenetz, Rückkühlung) hingegen werden nicht berücksichtigt. Sämtliche Investitionen werden mittels Annuitätenmethode in Jahreskosten umgerechnet. Aus allen Input-Parametern wird die Wirtschaftlichkeit für die beiden untersuchten Technologien bestimmt. Dabei werden die Jahreskosten von den Erlösen aus dem Pflanzenkohle- und Heizwärmeverkauf abgezogen und so der Jahresgewinn vor Steuern (EBT, Earnings Before Taxes) berechnet. Für die sechs wichtigsten Input-Parameter wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wird jeweils ein Parameter von 50% bis 150% variiert und alle übrigen Parameter-Werte bei 100% festgesetzt.



2 AP 1: Bewertung des Biomassepotenzials für die Pyrolyse (Meilenstein 1)

2.1 Vorgehen und Methode

Um weitere nicht-holzige und aschereiche Substrate für die Praxisanwendung in Pyrolyseanlagen nutzbar zu machen, werden die bekannten Biomassepotenziale hinsichtlich der spezifischen Anforderungen für die Pyrolyse «durchgekämmt» und deren Mengenpotenzial bestimmt.

In (Keel 2016) sind die möglichen «neuen» Biomassen für eine zusätzliche energetische Nutzung aufgeführt. Diese Biomassen werden im vorliegenden Projekt als mögliche Substrate zur Pflanzenkohleproduktion in den Fokus gestellt. Ergänzend zu dieser Substratliste werden aus (Thees et al. 2017) auch die Potenziale der verholzten Biomassen untersucht (Waldenergieholz, Flurholz, Restholz, Altholz), welche auch in (Keel 2016) abgehandelt werden.

2.1.1 Grobselektion der Substrate: Ausschlusskriterien

In einem ersten Schritt werden die Substrate nach dem Ausschlussverfahren vorselektiert. Folgende Ausschlusskriterien - nach absteigender Priorität geordnet - werden 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)

2.1.2 Feinselektion der Substrate: Kriterienerfüllung

In einem zweiten Schritt werden die Substrate bewertet; sie werden auf die Erfüllung folgender Kriterien hin untersucht. Dabei werden für Meilenstein 1 noch nicht alle Kriterien berücksichtigt; in der Tabelle in Abschnitt 2.2.2 wird deklariert, welche Kriterien berücksichtigt worden sind.

- Massen-, Energiepotenziale und Verfügbarkeiten in der Schweiz
- Substrateigenschaften physikalisch (ohne Aufbereitung)
- Substrateigenschaften chemisch
- Aufwand Aufbereitung und Pyrolyse
- Voraussichtliche Pflanzenkohlequalität
- Voraussichtliche Abgasemissionen



2.2 Ergebnisse und Diskussion

2.2.1 Ergebnisse der Grobselektion

Alle sechs Kriterien der Grobselektion werden für alle Substrate qualitativ beurteilt. Wenn ein Substrat zwei oder mehr Kriterien nicht erfüllt, wird es bei der Grobselektion nicht berücksichtigt.

Nach der Grobselektion der 32 Substraten in Tabelle 1 auf Seite 52 bleiben 15 Substrate übrig; sie haben die Grobselektion bestanden und sind in der Tabelle 1 grün markiert.

Folgende drei Substrate werden bei der Feinselektion mitberücksichtigt (davon werden zwei Substrate in je zwei Substrattypen aufgefächert):

- Trester: dient als Testsubstrat, um zu prüfen, dass es nach Nichterfüllung der Grobselektion (mehr als zwei Ausschlussmerkmale: dient als Futter, enthält Nährstoffe und ist feucht, s. letzte Spalte in Tabelle) auch durch die Feinselektion fallen wird.
 - Trester
- Übrige: Aufteilung in Kakaoschalen und Tabakstaub
 - Übrige: Tabakstaub
 - Übrige: Kakaoschalen
- Holz-Separierung Vergärung: hier wird unterschieden, ob es sich um Holz aus der Separierung vor resp. aus der Aussiebung nach dem Kompogasprozess handelt
 - Holz-Separierung vor Vergärung (Kompogasanlagen)
 - Holz-Siebreeste aus Gärgut fest (Kompogasanlagen)



Tabelle 1: Liste der betrachteten Ausgangsstoffe und ihrer energetischen Potenziale. Die Ausgangsstoffe, die die Grobselektion bestehen, sind grün markiert. Weist ein Substrat mehr als ein Ausschlussmerkmal auf (letzte Spalte) besteht es die Grobselektion nicht. Werte aus (Keel 2016) und berechnet aus (Thees et al. 2017; BAFU 2007, BFS 2017, BAFU 2019)

Biomasse	Aktuelle Nutzung	Nutzbares Potenzial ^a	Theoretisches Potenzial ^b	Ausschlussmerkmal
	GWh/a	GWh/a	GWh/a	
Wiesland	0	725	6'380	Futter, Nährstoffe, Feucht
Energiepflanzen (NaWaRo)	3	343	2'209	NaWaRo
Hofdünger	0	4'557	11'000	Nährstoffe, Feucht
Pferdemist-Einstreu	0	810	2'430	Nährstoffe
Hühnermist	0	70	140	Nährstoffe, Energieträger
Strukturreiche Biomasse Verkehrsflächen	0	54	180	Fremdstoffe
Strukturreiche Biomasse Ufer/Naturschutz	10	110	300	-
Fischerei- und Jagdabfälle	0	0	0	Futter, Nährstoffe, Energieträger, Feucht
Getreideabgang	5	40	40	Energieträger
Müllereiabfälle	0	360	720	Futter
Pilzsubstrate	0	125	125	Nährstoffe
Flotatschlämme Nahrungsmittelproduktion	0	0	4	Fremdstoffe, Feucht
Darm- und Panseninhalte	0	6	6	Fremdstoffe, Feucht
Hühnerfedern	0	68	100	Nährstoffe
Abfälle Fleischverarbeitung	0	0	81	Nährstoffe, Fremdstoffe, Feucht
Abfälle Kaffeerösterei	0	315	315	-
Milch- und Käseverarbeitung	0	0	300	Futter, Feucht
Trester	0	63	63	Futter, Nährstoffe, Feucht
Übrige ^c	0	180	360	Nährstoffe
Speiseöle und Fette	0	285	950	Fremdstoffe, Energieträger, Feucht
Biogene Abfälle aus Beherbergung	0	0	0	Energieträger, Feucht
Kaffeesatz	0	20	100	Nährstoffe
Klärschlamm	0	0	0	Nährstoffe, Fremdstoffe, Feucht
Biogener Kehrriecht	0	840	840	Nährstoffe, Fremdstoffe, Energieträger
Altpapier	35	320	320	Fremdstoffe, Energieträger
Waldholz	6'371	10'120	13'500 / (29'900 ^d)	Energieträger
Waldholz, nur Rinde (BAFU 2007)	NA	1'709	3'000	Energieträger
Restholz	2'760	2'875	2'875	Fremdstoffe, Energieträger
Altholz	2'230	2'920	2'920	Fremdstoffe, Energieträger
Holz-Vergärung (Festvergärung)	NA	108	108	(Fremdstoffe), Feucht
Holz-Vergärung (Flüssigvergärung)	NA	36	36	Nährstoffe, Feucht
Holz-Separierung Kompostierung	NA	188	188	Nährstoffe

^a Das nutzbare Potenzial entspricht der maximal nutzbaren Energiemenge abzüglich der aufgrund ökonomischer, ökologischer oder gesellschaftlicher Einschränkungen nicht nutzbarer Energiemenge.

^b Das theoretische Potenzial entspricht der maximal nutzbaren Energiemenge und berücksichtigt keine ökonomischen, ökologischen oder gesellschaftlichen Einschränkungen.

^c Biertreber, Zuckerrübenkraut, Tabakstaub, Kakao, Zuckerverarbeitungsabfälle, Brennereirückstände

^d Theoretisches Potenzial des gesamten Waldholzes (inkl. Industrie- und Bauholz)

2.2.2 Ergebnisse der Feinselektion

In der folgenden Tabelle werden alle Substrate, welche die Grobselektion bestanden haben, der Feinselektion unterzogen. Die rot unterlegten Kriterien werden dabei als Selektionskriterium verwendet. In den beiden Grenzwertspalten sind untere (blau) und obere Grenzwerte definiert. Wird der Grenzwert nicht eingehalten, erhält das Substrat einen Belastungspunkt (Anzahl Grenzwertüberschreitungen). Werden weniger als drei Grenzwerte überschritten, passiert das Substrat die Feinselektion und wird für die weiteren Untersuchungen ausgewählt. Die gesetzten Grenzwerte basieren einerseits auf regulatorischen Anforderungen (EBC, LRV, VVEA) und wurden andererseits vor allem bei qualitativen Beurteilungen von der Autorenschaft sinnvoll gesetzt. Unser Testsubstrat (Trester) hat die Feinselektion deutlich nicht bestanden, da es sechs Grenzwertüberschreitungen aufweist.

Feinselektion der Substrat-Kandidaten (Meilenstein 1)

		Grenzwerte		Total / Mittel	S1: Energiepflanzen (NaWaRo)	S2: Pflandemil-Einstreu	S3: strukturelle Biomasse Verkehrsflächen	S4: Strukturelle Biomasse Ufer/Naturschutz	S5: Getreideabgang	S6: Müllereisabfälle	S7: Pflanzsubstrate	S8: Hühnerfedern	S9: Abfälle Kaffeebohnen	S10: Trester	S11a: übrige: Tabakrauch	S11b: übrige: Kakaochalen	S12: Kaffeesatz	S13: Waldenergieholz, inkl. Rinde	S14: Waldholz, nur Rinde	S15: Holz-Separierung Vergärung (Kompostanlagen)	S15a: Holz-Siebreste aus Gärut fest (Kompostanlagen)	S16: Holz-Separierung Kompostierung (Platz und Feldbrand)	
Kriterium	[Einheit]	Minimal	Maximal																				
In Projektoffene aufgeführt						x		x	x	x	x		x	x			x		x		x	x	
Grobfilterung bestanden					x	x	x	x	x	x	x	x	x		x		x		x	x	x	x	
Energiepotenzial Schweiz																		[2], [5]	[4], [5], [6]	[3]	[3]	[3]	
Massenpotenzial Biomasse	Tonnen TS/a			9'637'610	470'000	583'200	40'625	74'809	10'000	158'950	41'058	28'500	59'500	14'100	8'892	7'520	25'000	7'300'000	730'000	32'500	10'938	42'018	
Theoretisches Energiepotenzial	GWh/a			39'948	2'209	2'430	180	300	40	720	125	100	315	63	34	35	164	29'900	3'000	108	36	188	
Nachhaltiges Energiepotenzial	GWh/a			11'681	343	810	54	110	40	360	125	68	315	63	34	35	33	7'250	1'709	108	36	188	
Zusätzlich Nutzbares Energiepotenzial	GWh/a	320		6'883	340	810	54	100	35	360	125	68	315	63	34	35	33	2'470	1'709	108	36	188	
Pflanzenkohleproduktion																							
Saisonale Verfügbarkeit	1: Sommer/2: Winter/3: kontinuierlich	2		379'936	16'638	44'712	2'803	5'735	2'013	18'279	9'443	4'457	13'685	3'243	2'045	1'730	1'150	138'700	95'647	7'475	2'516	9'664	
Langfristig vorhanden?	1: bis 5a/2 bis 10a/3: bis 20a	2			2	3	3	3	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	3	
Langfristig vorhanden?	1: bis 5a/2 bis 10a/3: bis 20a	2			3	2	3	3	3	3	2	3	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	
Substrateigenschaften physikalisch																							
Heizwert Trockensubstanz	kWh/kgTS	3.0		4.25	4.70	4.17	4.43	4.01	4.00	4.53	3.04	3.51	5.29	4.47	3.83	4.72	6.57	4.09	4.09	3.31	3.31	4.48	
Feuchtegehalt	%-massen		40%	31%	50.0%	30.0%	37.50%	36.5%	15.0%	15.0%	25.3%	5.0%	15.0%	70.0%	5.0%	6.0%	50.0%	45.9%	30.0%	35.0%	31.6%	50.3%	
Korngrösse	mm				2-200																		
Rieselfähigkeit & Förderbarkeit	1: sehr schlecht/2: mässig/3: sehr gut	2			3	1	1	1	3	3	1	2	3	1	3	3	2	2	2	2	2	2	
Lagerdichte	kgTS/m3					350																	
Lagerfähigkeit	1: sehr schlecht/2: mässig/3: sehr gut	2			3	2	2	2	3	3	1	3	3	1	2	3	1	2	2	2	2	2	
Nachweis Pellitierbarkeit						x						x											
Substrateigenschaften chemisch																							
Elementaranalyse:	% bezogen auf TS																						
Kohlenstoff - C				43.03	47.80	46.90	37.03	35.29	41.38	44.34	27.71	44.78	49.40		43.00	47.00	59.68	49.19	52.47	32.69	32.64	40.20	
Wasserstoff - H				4.79	5.40	5.70	4.33	3.95	5.10	5.99	3.26	0.45	6.10		4.50	5.50	8.47	5.90	5.84	3.38	3.45	4.10	
Sauerstoff - O				34.56	40.94	43.30	29.04	26.90	35.19	49.17	29.60	27.46	41.20		35.80	36.16	29.38	44.12	36.75	23.69	24.17	34.59	
Stickstoff - N				2.22	0.37	1.80	1.26	1.01	3.04	1.63	2.21	17.76	0.81		0.50	3.05	1.59	0.25	0.35	0.63	0.72	0.69	
Schwefel - S			1.00	0.88	0.05	0.14	0.16	0.14	0.19	0.47	2.91	9.55	0.07		0.40	0.21	0.16	0.02	0.03	0.12	0.16	0.12	
Schwermetallgehalte:	mg/kgTS	Futter	Boden																				
Blei (Pb)		2.0	24.00																				
Cadmium (Cd)		0.2	0.20																				
Kupfer (Cu)		20.0	20.00																				
Nickel (Ni)		6.0	6.00																				
Quecksilber (Hg)		0.02	0.20																				
Zink (Zn)		80.0	80.00																				
Chrom (Cr)		16.0	16.00																				
Arsen (As)		0.4	2.60																				
Chlorgehalte	mg/kgTS		2'500	1'621	1'600	2'200	2'439	1'827	3'841	3'841	7'491.0	1'400	300		2'819	800	202	174	190	910	1'749	1'647	
Aschengehalt total	%-massen/TS		40%	16%	5.28%	5.80%	28.05%	32.6%	13.68%	2.89%	43.35%	0.50%	2.50%		17.40%	9.20%	0.68%	0.51%	4.61%	39.37%	38.66%	20.00%	
Ascheschmelzpunkt	°C																						
Geeignete und/oder praktizierte Entsorgungswege																							
Verbrennung KVA			nicht alle					x		x					x	x			x	x	x	x	
Biomassefeuerung			nicht alle		x		x		x						x	x	x	x	x	x	x	x	
Vergärung			nicht alle			x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x						
Kompostierung			nicht alle			x	x		x	x	x		x	x	x	x	x		x				
Futtermittel/Dünger			nicht alle								x	x		x									
Aufwand Aufbereitung										Mühle	Mühle	Schlachthaus	erösterei		Tabakhandel	Kakao	estaurant						
Einsammellogistik	GWh/# Punkte	0.10		31'514	100'000	3'089	100'000	100'000	640	640	14	79	139		338	214	30'269	100'000	100'000	29	29	261	
Konstanz der Substratzusammensetzung: Hor 1: sehr schlecht/2: mässig/3: sehr gut		2			3	2	2	2	3	3	2	3	3	1	3	3	3	2	3	2	2	2	
Reinigung (Plastik, Steine, Metalle): Aufwand v CHF/t TS			200		0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	20	20	
Trocknung: Aufwand wenn nötig	CHF/t TS		total		0	10	10	10	0	0	20	0	0	20	0	0	10	10	5	15	10	10	
Zerkleinerung/Siebung/Pelletierung: Aufwand v CHF/t TS			total		20	180	20	20	180	180	180	20		180	180	20	180	20	20	20	20	20	
Voraussichtliche Kohlequalität																							
EBC premium*:																							
u.a. Schwermetallgehalte:	mg/kgTS	Futter	Boden																				
Blei (Pb)		< 10	120																				
Cadmium (Cd)		< 1	1																				
Kupfer (Cu)			100																				
Nickel (Ni)			30																				
Quecksilber (Hg)		< 0.1	1																				
Zink (Zn)			400																				
Chrom (Cr)			80																				
Arsen (As)		< 2	13																				
zudem:																							
Aschegehalt	%-massen/TS	< 20	50%		18%	17%	61%	66%	39%	11%	75%	2%	9%		46%	29%	3%	2%	16%	72%	72%	50%	
Cfix-Kohlenstoffgehalt	%-massen/TS																						
Korngrösse	mm																						
Chrom VI**	mg/kg																						
Voraussichtliche Abgasemissionen																							
Stickoxide NOx (NO2)	mg/Nm3 @13%O2		250	400	80	164.2	355.0	304.7	279.1	405.0	333.8	368.6	606.9	253.8		198.6	405.4	330.9	96.0	157.8	225.1	239.8	235.5
Kohlenmonoxid CO	mg/Nm3 @13%O2		500	500	50		1.0																
Staub	mg/Nm3 @13%O2		20	20	10																		
Dioxine und Furane	mg/Nm3 @13%O2			0.1	0.1		1.0																
Schwefeldioxid SO2	mg/Nm3 @13%O2			200	50	62.5	185.0	198.6	179.1	237.3	587.1	3'634.9	11'931.7	87.4		499.6	262.3	199.9	30.0	37.5	149.9	200.5	149.9
Anzahl Grenzwertüberschreitungen					2	1	4	4	5	2	8	4	1	6	3	4	4	2	1	2	3	2	
Bewertung: jene 6 Substrate mit weniger als 3 Grenzwertüberschreitungen werden untersucht					x	x				x			x				x	x	x			x	

* Grenzwerte gemäss European Biochar Certificate EBC, Juni 2020

** Grenzwert gemäss Abfallverordnung VVEA: 0.5 mg/kg TS, Grenzwert Düngemittelverordnung Deutschland: 2.0 mg/kg TS

Quellen (wenn nicht anders vermerkt ist die Quelle [1]):

[1] Neue Biomasse-Brennstoffe - eine Bestandaufnahme, Andreas Keel, 2016.

[2] Biomassenpotenziale der Schweiz für die energetische Nutzung, W



Von den 18 Substraten der Grobselektion passieren acht Substrate die Feinselektion (s. Tabelle auf der vorangehenden Seite). Davon werden Energiepflanzen und Waldenergieholz ausgeschlossen, da es sich dabei nicht um neue Biomassen handelt. Sie werden jedoch zum Vergleich zu den übrigen 6 Substraten (s. folgende Liste) auch mituntersucht, weil heute fast ausschliesslich Waldenergieholz als Substrat für Pflanzkohle eingesetzt wird und das mit Abstand grösste Potenzial für die Pflanzkohle Produktion aufweist.

- 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)

Im Folgenden werden die untersuchten Substrate und deren Potenziale tabellarisch (Tabelle 2) und graphisch () ausgewertet.

Tabelle 2: Übersicht über die Massenpotenziale und Potenziale für zusätzliche Energie- oder Pflanzkohleproduktion. Die in der letzten Spalte aufgeführte Pflanzkohleproduktion würde erzielt, wenn das gesamte Substrat des zusätzlich nutzbaren Energiepotenzial zu Pflanzkohle umgewandelt würde (23% bzgl. dem TS-Massengehalt, Erfahrungswerte Kaskad-E). Dabei würde ca. 50% des zusätzlichen Energiepotenzials der Pflanzkohle «verschenkt».

Substrate	Massenpotenzial Biomasse	Theoretisches Energiepotenzial	Nachhaltiges Energiepotenzial	Zusätzlich nutzbares Energiepotenzial	maximale Pflanzkohleproduktion aus zusätzlichem Energiepotenzial
	t _{TS} /a	GWh/a	GWh/a	GWh/a	t _{TS} /a
Pferdemist	583'200	2'430	810	810	44'712
Müllereiabfälle	158'950	720	360	360	18'279
Kaffeeabfälle	59'500	315	315	315	13'685
Rinde	730'000	3'000	1'709	1'709	71'735
Holz-Vergärung	32'500	108	108	80	5'557
Holz-Kompostierung	42'018	188	188	126	6'475
Summe 6 Substrate	1'606'168	6'761	3'490	3'400	160'443

Der Umwandlungsgrad von Biomasse zu Pflanzkohle wurde im Mittel mit 23% TS Pflanzkohle pro TS Biomasse angenommen (Tabelle 2). Dabei geht ca. 50% des Energiepotenzials verloren resp. wird mit der Pflanzkohle abgeführt. Vergaseranlagen wurden generell in dieser Studie nicht berücksichtigt,



da bei diesen Anlagen die Pflanzenkohle kein Hauptprodukt darstellt und deutlich unter 10% TS PK pro TS Biomasse entsteht. Bei Top Lit Updraft-Anlagen (TLUD) beträgt der Umwandlungsgrad ca. 21%, bei extern beheizten Pyrolysereaktoren kann er bis zu 27% erreichen (abhängig von der Holzfeuchte, Erfahrungswerte Kaskad-E).

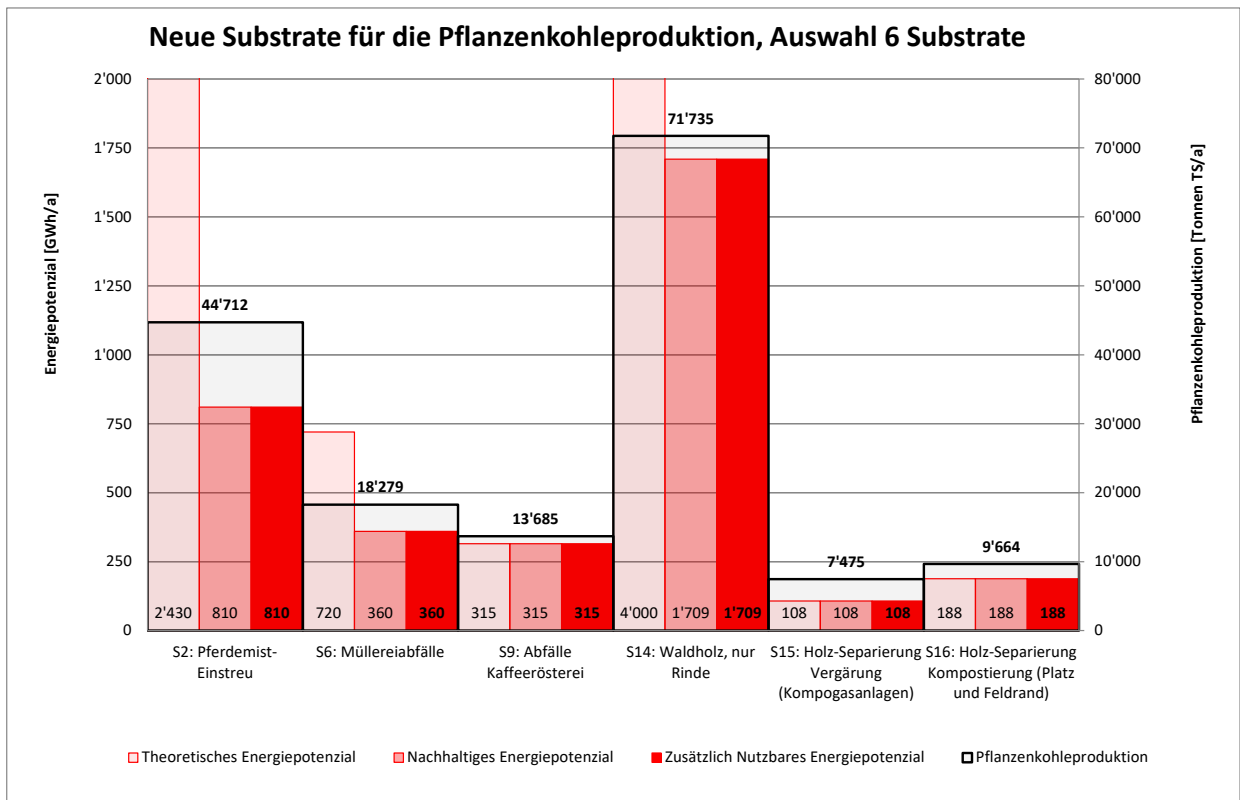


Abbildung 2: Energie- und Pflanzenkohlepotenziale der sechs untersuchten Substrate nach der Feinselektion.

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. Unsicher ist indes der Aufwand für die separate Verarbeitung.

Bei Pferdemist werden die Versuche zeigen müssen, ob bei den eher kritischen Stickstoff- und Chlorgehalten die Abgasemissionsgrenzwerte eingehalten werden können. Dies gilt auch für die Müllereiabfälle, wobei bei diesen die noch höheren Chlorgehalte entscheidend sein könnten.

Für die holzigen Siebreste aus Kompost- und Vergärungsanlagen hingegen dürften die Verunreinigungen Schwierigkeiten machen. Dabei sind die Kunststoffe eher weniger kritisch, da sie bei der Pyrolyse ziemlich vollständig als Pyrolysegase entweichen, welche sehr sauber verbrannt werden können (vorausgesetzt, es hat wenig chlorierte Kunststoffe darunter). Hingegen machen es die hohen mineralischen Verunreinigungen durch Sand und Erde schwierig, den nötigen Kohlenstoffgehalt der Pflanzenkohle zu erreichen. Futterkohle lässt sich aus diesen Substraten mit Sicherheit keine herstellen.



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

3.1 Vorgehen und Methode

3.1.1 Beschreibung der Laboranlage der FHNW

Die kontinuierliche Pyrolyseanlage an der FHNW, PyroTube genannt, hat eine variable Leistung zwischen 3.5 kW und 8 kW thermisch, je nach Art und Menge des pyrolysierten Brennstoffs. Die Laboranlage wurde erstmals für die Analyse der Substrate im Rahmen von Arbeitspaket 3 des vorliegenden Forschungsprojektes eingesetzt.

Im Funktionsbild unten sind die Komponenten der Anlage schematisch dargestellt und werden im Folgenden beschrieben: Die Reaktortemperatur kann beliebig zwischen ca. 200 °C und 750 °C variiert werden. Der **Reaktor (A)** wird durch **elektrische Widerstände (B)** beheizt. Der Brennstoffmassenstrom kann kontinuierlich zwischen 15 und 150 g/min variiert werden. Die Anlage ist aus hitzebeständigem Edelstahl gefertigt und hermetisch dicht. Die Atmosphäre im Reaktor ist inert, und das kontinuierliche Rühren des Brennstoffs, das durch die **Dosierschnecken (C)** verursacht wird, sorgt für eine gleichmässige Verkohlung. Durch Schlitze im Reaktorrohr kann das erzeugte Pyrolysegas freigesetzt und mit einem Stickstoffstrom in die **Brennkammer (D)** geleitet werden. Dort wird es in zwei Stufen verbrannt, um die NO_x-Emissionen sowie CO und unverbrannte Kohlenwasserstoffe so weit wie möglich zu begrenzen. Die gesamte Anlage ist mit Temperatursensoren, einer **Lambda-Sonde (E)**, Sensoren

zur Analyse des produzierten Gases und der Abgase und Schaugläsern ausgestattet. Aufgrund ihrer begrenzten Grösse kann die Anlage nur Brennstoffe in Granulat- oder Pelletform verarbeiten. Der Brennstoff wird in einem luftdichten **Behälter (F)** gelagert und über eine Zellschleuse in den Reaktor dosiert. Die beiden Dosierschnecken, mit welchen die Anlage ausgestattet ist, transportieren den Brennstoff durch den Reaktor. Am Ende der Pyrolyse wird die entstandene Pflanzenkohle in einem luftdichten **Behälter (G)** gelagert.

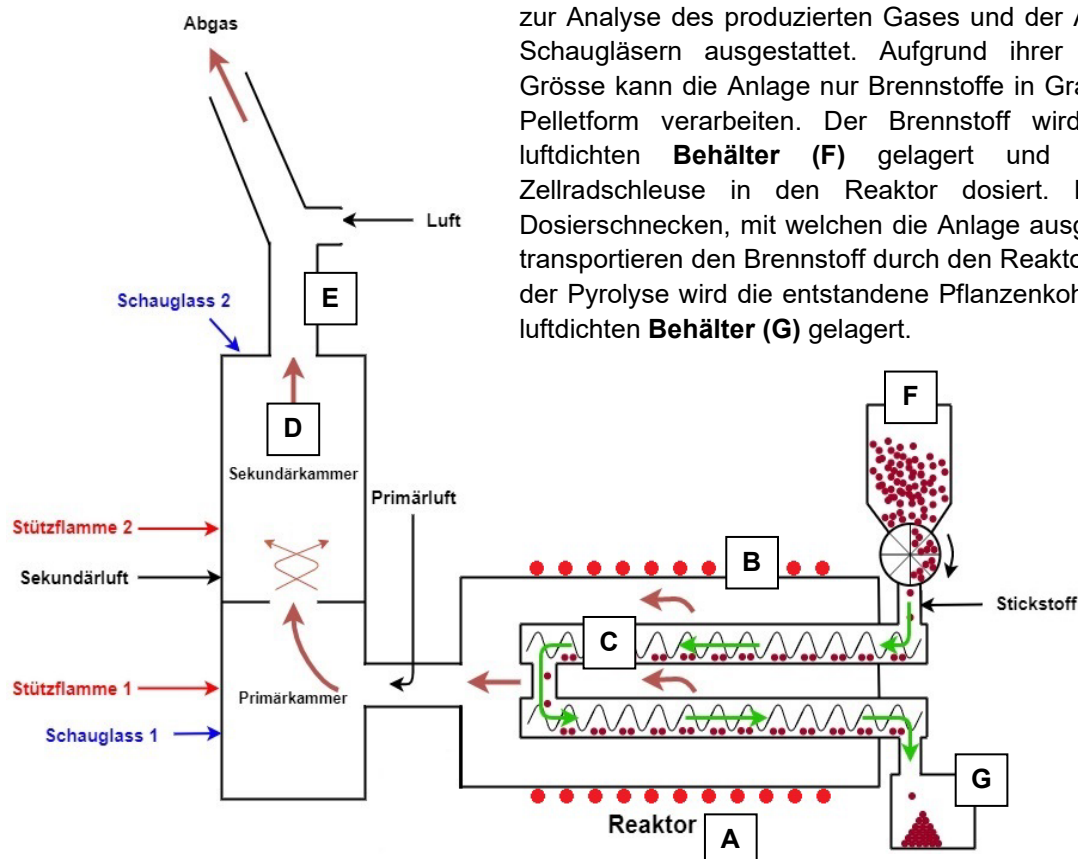


Abbildung 3: Prozessdiagramm der FHNW-Pyrolyseanlage PyroTube.



3.1.2 Durchführung Laborversuche

Insgesamt wurden 10 Versuche zwischen dem 18.02.2020 und 07.05.2021 durchgeführt. Tabelle 3 gibt einen allgemeinen Überblick über die durchgeführten Versuche.

Tabelle 3: Übersicht der durchgeführten Versuche

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

3.1.3 Aufbereitung der Substrate

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.

3.1.4 Analysen der Substrate

Die folgenden Eigenschaften des Substrats wurden untersucht: Wassergehalt, Aschegehalt, Schüttdichte, Elementare Zusammensetzung (C, H, N, S) und Brennwert.

3.1.5 Analysen von Abgas der Pyrolysegasverbrennung

In Tabelle 4 sind die durchgeführten Abgasmessungen sowie die verwendeten Messprinzipien und Gerät zusammengestellt. Alle Ergebnisse (ausser O₂ und CO₂) beziehen sich auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von 13 %. Normkubikmeter (Nm³) ist auf die Normbedingungen von 273 K und 1'013 mbar bezogen.

Bei ausgewählten (chlorhaltigen) Substraten wurden auch Dioxine und Furane gemessen. Dabei ist es bekannt, dass der Chlorgehalt im Brennstoff kein eindeutiges Indiz für die Vorhersage von Dioxin ist.



Tabelle 4: Übersicht über die gemessenen Parameter im Abgas

Parameter	Messprinzip	Messgerät / Methode
Sauerstoff (O ₂)	elektrochemisch	Gas-Analysator MRU MAG 5+
Kohlendioxid (CO ₂)	NDIR ^a	Gas-Analysator MRU MAG 5+
Stickoxide (NO _x)	elektrochemisch	Gas-Analysator MRU MAG 5+
Schwefeloxide (SO ₂)	elektrochemisch	Gas-Analysator MRU MAG 5
Kohlenmonoxid (CO)	NDIR ^a	Gas-Analysator MRU MAG 5+
Methan (CH ₄)	NDIR ^a	Gas-Analysator MRU MAG 5+
Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (PCDD/F)	GC-HRMS ^b	Gekühltes-Absaugrohr-Methode

^a Nichtdispersive Infrarot-Photometrie^b Gaschromatographie high-resolution Massenspektrometer

Tabelle 5 enthält die Emissionsgrenzwerte für die verschiedenen Verbrennungsanlagen. Für die Beurteilung der Emissionen der Pyrolysegasverbrennung wurden die Grenzwerte der Luftreinhalteverordnung (LRV) Art. 74 «Anlagen zum Verbrennen von biogenen Abfällen und Erzeugnissen der Landwirtschaft» berücksichtigt (s. folgende Tabelle). Sind die Input-Substrate keine naturbelassenen Brennstoffe wie die holzigen Siebrückstände aus der Vergärung und Kompostierung, die eine gewisse Kunststoffbelastung aufweisen, sind diese möglicherweise als Siedlungsabfälle zu deklarieren.

Tabelle 5: Emissionsgrenzwerte für verschiedene Verbrennungsanlagen

		Emissionsgrenzwerte			
		Holzfeuerungen ^a	Anlagen zum Verbrennen von biogenen Abfällen und Erzeugnissen der Landwirtschaft ^b	Anlage zum Verbrennen von Siedlungs- und Sonderabfällen	
		LRV Anhang 3 Ziffer 522	LRV Art. 74 Anhang 2 Ziffer 742	LRV Art. 71 Anhang 2 Ziffer 714	
Parameter	Einheit	@13%O ₂	@13%O ₂	@11%O ₂	@13%O ₂ ^d
NO ₂	mg/Nm ³	-	250 ^c	80 ^c	64
SO ₂	mg/Nm ³	-	-	50	40
CO	mg/Nm ³	500	500	50	40
Staub	mg/Nm ³	20	20	10	8
PCDD/F	ng/Nm ³	-	-	0.1	0.08

^a Feuerungswärmeleistung 500 kW – 1 MW^b Feuerungswärmeleistung bis 1 MW^c Wenn ein NO_x-Massenstrom von 2'500 g pro Stunde überschritten wird.^d Umrechnung auf Bezugs-O₂ von 13 Vol.-%

3.1.6 Analysen der Pflanzenkohle

Die folgenden Eigenschaften der Pflanzenkohle wurden untersucht: Wassergehalt, Aschegehalt, Elementare Zusammensetzung (C, H, N, S) und Brennwert. Zusätzlich wurden die Pflanzenkohleproben



an ein externes Labor geschickt und nach dem EBC-Basic Analysepaket (Stand 2021) analysiert⁶. Die EBC-Zertifizierungsklassen und die damit verbundenen Grenzwerte werden als Referenz für die Bewertung von den Pflanzenkohlen herangezogen (EBC 2012-2022) (Version 10.1). Für eine bessere Lesbarkeit werden nur die Eigenschaften von Pflanzenkohle, die als besonders relevant angesehen werden, in den Bericht eingebracht. Die Eignung der Pflanzenkohle zur Einordnung in die EBC-Klassen erfolgt auf der Grundlage der hier durchgeführten Analyse. Ein Zertifizierungsprozess ist jedoch notwendig, um eine abschliessende Klassifizierung der Pflanzenkohle in EBC-Klassen vorzunehmen.

3.2 Ergebnisse und Diskussion

3.2.1 Beschreibung der Substrate



Holzhackschnitzel

Holzhackschnitzel dienen als Referenzsubstrat für andere, da ihre Verwendung als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Pflanzenkohle weit verbreitet ist und die Qualitätsanforderungen des EBC nachweislich erfüllt. Da naturbelassenes Holz unbehandelt und unverschmutzt ist, ist mit geringen Schadstoffkonzentrationen in der Pflanzenkohle und im Abgas zu rechnen.

Pferdemist

Pferdemist ist eine Teilfraktion des Hofdüngers, welche bei der landwirtschaftlichen Tierhaltung anfällt. Hofdünger besteht entweder aus Gülle, Gülle und Mist oder nur aus Mist. Bei der Pferdehaltung fällt nur Mist an, welcher in der vorliegenden Studie als Pferdemist bezeichnet wird. Die Zusammensetzung des Pferdemistes hängt von der Ernährung der Pferde und der Art der Einstreu. Die Herkunft des Substrats ist somit entscheidend und beeinflusst die Qualität der damit produzierten Pflanzenkohle und die Abgasemissionen. Während der Untersuchung ist spezifisch auf den Chlorgehalt zu achten, welcher z. B. aus der Salzzugabe des Pferdefutters stammen kann.

Der für die Laborversuche verwendete Pferdemist wird zu ca. 10 Gew.-% mit Getreideabgang gemischt und pelletiert.

⁶ Keine EBC-Zertifizierung



Müllereiabfälle (Gerstenabgang)

Das Substrat «Müllereiabfälle (Gerstenabgang)» stammt aus der Lagerung von Gerste vor der Mahlung. Es ist eine Teilmenge der Müllereiabfälle und repräsentiert mit rund 35 GWh/a nur 10% des Gesamtpotenzials der Müllereiabfälle. Heute werden Müllereiabfälle in der Regel entsorgt, verbrannt als Co-Substrat in Biogasanlagen eingesetzt oder als Futtermittel verwendet (Keel 2016).

Müllereiabfälle (Weizenkleie)

Weizenkleie ist Teil der Müllereiabfälle und entsteht bei der Mahlung von Getreide und wird heute im Mischfutter eingesetzt. Dieses Substrat weist ähnliche (tendenziell bessere) Brennstoffeigenschaften wie Gerstenabgang auf und macht mit rund 153 GWh/a jedoch den Hauptteil des Potenzials von Müllereiabfällen aus (42%). Heute wird das Substrat zu stetig sinkenden Preisen meist als Futtermittel verkauft. Der künftige Absatz ist nicht gesichert, da die Kleie durch verbesserte Mahlung immer weniger Stärke enthält (sinkende Futterqualität) und die Mühlen daher neue Absatzmöglichkeiten suchen⁷.

In der vorliegenden Studie wird aufgrund der grösseren verfügbaren Mengen statt Gerstenabgang im Folgenden nur noch Weizenkleie untersucht.

Kaffeeabfälle

Dieses Substrat besteht aus den Resten des Pergamenthäutchens, welche in der ersten Phase des Röstprozesses von Kaffeebohnen abblättern. Das Substrat wird bereits heute in einigen Röstereien (z.B. Café Blaser) pelletiert, um Platz zu sparen und die Staubentwicklung und die damit verbundene Explosionsgefahr zu reduzieren. Die Pellets werden anschliessend kostenpflichtig entsorgt und gelangen in die KVA oder in Biogasanlagen⁸.

Rinde

Rinde fällt v.a. bei der Schälung von Nadelhölzern an; ca. hälftig vor Ort im Wald und in den Sägewerken. Das Substrat besitzt ein ausgewiesenes zusätzliches Energiepotenzial von 1'709 GWh/a. Heute wird Rinde je nach Jahreszeit zu Heizzwecken, zur Kompostierung oder als Abdeckmaterial im Gartenbau genutzt.

Holz-Vergärung

Drei Holzfraktionen fallen bei der Vergärung an. Es wird zwischen den folgenden Fraktionen unterschieden:

- Der «Siebrückstand grün» wird vor dem Kompogas-Prozess abgeschieden und beinhaltet das Inputmaterial, welches zu gross für die Anlagen ist.
- Der «Siebrückstand Bunker» enthält grobe Holzstücke und wird vor dem Kompogas-Prozess abgeschieden.
- Der «Siebrückstand braun» entsteht nach dem Kompogas-Prozess und enthält holziges Material, welches 80-90% der Gesamtmenge ausmacht und aufgrund des hohen Nährstoffgehaltes interessant für die Landwirtschaft ist, da viel Nährstoffe. Diese Fraktion ist meist durch Störstoff/Plastik kontaminiert und wird deshalb heute in die KVA geführt.

In der vorliegenden Studie wird aufgrund der grösseren verfügbaren Menge nur der «Siebrückstand braun» untersucht. Dem Substrat wird kontrolliert 2% Kunststoff beigemischt, um die reale Fremd-

⁷ Quelle: NZZ, 20.1.2021, Seiten 8/9 (Kleie: 20% von 190'000 Tonnen Weizen pro Jahr, Heizwert Kleie ca. 4 kWh/kg).

⁸ Quelle: Café Blaser, Bern



stoffbelastung von 0.5% bis 7% zu simulieren. Zusätzlich zur Beimischung von Kunststoff wird das Substrat getrocknet, aussortiert (Steine, Metallstücke, Keramikteile), zerkleinert und pelletiert.

Holz-Kompostierung

Bei der Kompostierung fallen die zwei folgenden Holzfraktionen an:

- Holz, welches während den Wintermonaten von LandschaftsgärtnerInnen geliefert wird und direkt an eine Verbrennungsanlage weitergegeben wird.
- Holz, welches nach dem Kompostierungsprozess ausgesiebt wird und dem Prozess nochmals zugeführt wird. Die Holzmengen sind für einen optimalen Kompostprozess in der Regel viel zu gross und überschüssiges Holz muss entsorgt werden.

In der vorliegenden Studie wird die Holzfraktion analysiert, welche nach dem Prozess ausgesiebt und dem Prozess nochmals zugeführt wird. Die Vorbereitung des Substrats besteht aus Trocknung, Zerkleinerung und Pelletieren.

3.2.2 Analysen der Substrate

Die folgende Tabelle fasst die Eigenschaften der Substrate zusammen.

Tabelle 6: 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}			
Holzackschnitzel	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

3.2.3 Abgasemissionen der Pyrolysegasverbrennung

In der Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Abgasmessungen auf der Laboranlage zusammengefasst. Die CO-Emissionen liegen alle weit unter dem Grenzwert gemäss Luftreinhalteverordnung (LRV, Art. 74, Ziffer 742). Die Methanemissionen haben in der LRV keine Begrenzung, werden aber der Vollständigkeit halber dargestellt und müssen bzgl. Klimawirkung im Auge behalten werden. Die Schwefeldioxid (SO₂)-Emissionen sind mit Vorsicht zu interpretieren und aufgrund der Messmethodik⁹ nur im relativen Vergleich verlässlich. Daher werden hier Grenzwertüberschreitungen nicht als hartes Substratausschlusskriterium verwendet. Fehlende Messergebnisse sind im Umkehrschluss nicht als «Grenzwert

⁹ Es gibt eine Querempfindlichkeit im elektrochemischen Sensor zwischen CO und SO₂: Die SO₂-Werte sind bei hohen CO-Werten zu tief. Bei sehr hohen CO-Emissionswerten gibt es sogar ein negatives SO₂ Signal.



erfüllt» zu taxieren. Dioxin wurde nur bei den beiden Substraten mit den höchsten Chlorgehalten im Ausgangsmaterial gemessen. Beide Werte überschreiten den Grenzwert klar. Mehr zur Dioxinbildung findet sich in Abschnitt 3.2.4 PCDD/F-Bildung (Dioxinbildung). Grundsätzlich gibt es für SO₂- und Dioxin-Emissionen bei naturbelassenen Brennstoffen gar keine Grenzwerte. Da insbesondere Dioxin sehr toxisch ist und die Beurteilung bei nicht-Regelbrennstoffen rechtlich (noch) unklar ist, sollen hier vorbeugend die strengen Grenzwerte gemäss LRV Art. 71 für Anlagen zum Verbrennen von Siedlungs- und Sonderabfällen (s. Tabelle 5 auf Seite 58) herangezogen werden.

Tabelle 7: 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%

3.2.4 PCDD/F-Bildung (Dioxinbildung)

Die Bildungsmechanismen der PCDD/F bei der konventionellen Verbrennung sind insbesondere von folgenden Faktoren abhängig (BFE 2017):

- Chlorgehalt im Brennstoff
- Kupfergehalt im Brennstoff (Katalysator für de-Novo-Synthese)
- Ausbrandqualität von Gasen und Feststoff
 - Gasförmige Kohlenwasserstoffe (insbesondere zyklische Aromaten)
 - Zusammensetzung/Kohlenstoffgehalt der Flugasche (Staub) und Ascherückstände in den Abkühlungszonen (Memory Effekte)
- Temperatur, Verweilzeit und O₂-Gehalt der Abgase

Die meisten Mechanismen gelten auch für die Verbrennung von Pyrolysegasen. Doch dürfte der geringere Staubanteil und die reduzierenden Bedingungen bei der Pyrolyse die Dioxinbildung eher verringern. Diese Vermutung wird durch Abbildung 4 bestätigt. Bei den vorliegenden beiden



Dioxinmessungen (Pferdemist-Einstreu und Holz aus der Vergärung) wurde das Abgas sogar systematisch durch ein Temperaturfenster von 200-400°C geführt, um die Dioxinbildung nach Möglichkeit zu begünstigen. Trotzdem kam es nicht zu höheren Dioxinwerten als dies die Chlorgehalte erwarten lassen würden – im Gegenteil. Abbildung 4 illustriert dies und verdeutlicht den steigenden Dioxinemissionen mit steigendem Chlorgehalt im Brennstoff.

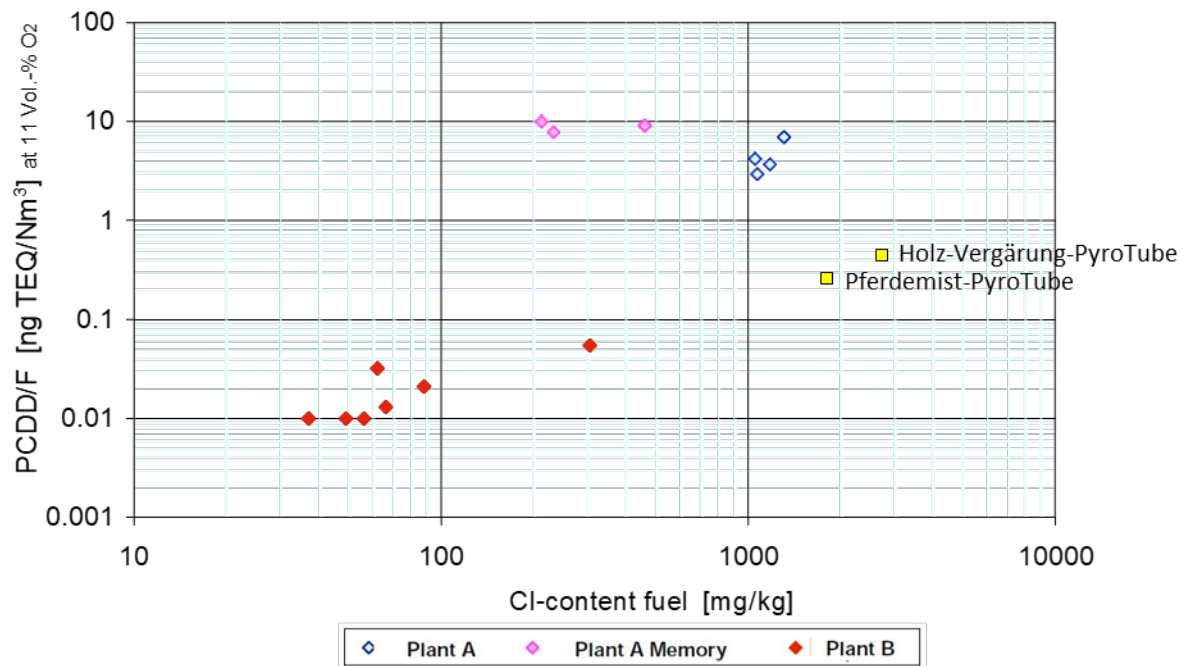


Abbildung 4: PCDD/F-Emissionen bei Messungen an zwei gewerblichen Restholzfeuerungen aus (BFE 2017). Schema angepasst mit zwei Messwerten, die an der Laboranlage gemessen wurden (Versuch mit Pferdemist und Holz-Vergärung). Es ist erkennbar, dass die PCDD/F-Bildung bei der Pyrolyse im Vergleich zur konventionellen Verbrennung leicht tiefer ist. Diese These muss mit mehr Messungen erhärtet werden.

3.2.5 Eigenschaften der Pflanzenkohle

Tabelle 8: Übersicht Pflanzenkohlequalität physikalische Eigenschaften.

Pflanzenkohle aus Substrat	Aschegehalt	Wassergehalt	Heizwert trocken	Pflanzenkohle- ausbeute
	Ma.-% _{wf}	Ma.-%	MJ/kg _{wf}	kg _{PK_wf} /kg _{Sub_wf}
Holzhackschnitzel	8.4	3.0	31.6	0.19
Pferdemist	19	1.3	27.4	0.27
Gerstenabgang	20.6	1.3	26.2	0.23
Weizenkleie	25.2	1.1	24.9	0.27
Kaffeeabfälle	29.2	0	23.6	0.24
Rinde	13.8	1.1	29.6	0.26
Holz-Vergärung	40.2	0.7	19.2	0.32
Holz-Kompostierung	46.5	1.2	18.4	0.30

wf: wasserfrei

PK: Pflanzenkohle



Tabelle 9: 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.

	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]fluoranthren	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
Holz hackschnitzel	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



3.3 Bewertung der untersuchten Substrate

Holzhackschnitzel

Die Abgaswerte von naturbelassenen Holzhackschnitzeln sind alle unkritisch und können alle Grenzwerte einhalten.

Die Analyse der Pflanzenkohlequalität zeigt jedoch, dass einige Grenzwerte nicht eingehalten werden: So liegen die Zinkgehalte deutlich über dem höchsten Grenzwert von «EBC-Gebrauchsmaterial», was sich nicht erklären lässt. Zudem sind auch die PAK-Werte der Pflanzenkohle massiv über dem Grenzwert (s. Tabelle 9 und Anhang 11.1). Grundsätzlich liegen die PAK-Werte der Pflanzenkohleproben, welche aus den gleichen Hackschnitzeln auf der Biomacon-Anlage in Flaach produziert wurden, deutlich unter dem EBC-PAK-Grenzwert von «EBC-Agro». Die Überschreitungen bei der Laboranlage kommen vermutlich daher, dass bei den ersten Versuchen mit Hackschnitzeln teilweise noch Teerkondensation auf der Pflanzenkohle aufgetreten sind. Nach den Optimierungsmassnahmen an der Laboranlage (s. Abschnitt 3.1.1) konnte dieses Problem gelöst werden; praktisch alle Substrate hatten in der Folge die PAK-Grenzwerte eingehalten. Somit konnten die nötigen Pyrolyseparameter (Reaktortemperatur, Wassergehalt und Verweildauer) gut auf die Betriebsparameter der Anlage in Flaach abgestimmt werden und die Qualitätsziele erreicht werden.

Pferdemist

Die Analyseergebnisse des Ausgangssubstrates zeigen, dass Pferdemist-Einstreu bzgl. Stickstoff- und Chlorgehalt überdurchschnittlich hohe Werte aufweist. Zwar sind die Stickoxidemissionen erstaunlich tief (im Durchschnitt der übrigen Substrate), doch wurden hohe erhöhte Schwefeldioxid- und v.a. sehr hohe Dioxin-Emissionen gemessen: Die relevanten PCDD/F-Konzentrationen im Abgas sind mehr als doppelt so hoch wie der Grenzwert für Abfallverbrennung. Diese hohen Dioxin-Emissionen lassen sich auch durch die in Kombination mit Chlor sehr hohen Eisengehalte erklären.

Die Analyse der Pflanzenkohlequalität zeigt, dass auch hier die Pferdemist-Einstreu einige Grenzwerte nicht einhalten kann: Die Nickel- und Chromgehalte übersteigen sogar die Grenzwerte für «EBC-Gebrauchsmaterial» deutlich. Problematisch sind auch Zink und ein leicht erhöhter PAK-Wert (s. Tabelle 9 und Anhang 11.1). Hingegen ist der Phosphorgehalt mit ca. 3.5% ziemlich hoch und würde mit der Kohle in den Boden zurückgeführt (s. Anhang 11.8 Laborergebnisse Eurofins).

Aufgrund dieser Ergebnisse wird Pferdemist-Einstreu in diesem Forschungsprojekt nicht mehr weiter untersucht. Da das Interesse der Pferdebesitzer, den Pferdemist auf eine ökologische Art zu verwenden, jedoch sehr gross und das energetische Gesamtpotenzial beachtlich ist, ist dieses Substrat dennoch interessant. Folgende Überlegungen sind künftig zu berücksichtigen:

- Die Einstreu ist so zu gestalten, dass sie sehr pyrolysefreundlich ist. Zum Beispiel Baumrinden-Einstreu. Diese wird heute unter «Walderde-Einstreu» bereits auf dem Markt angeboten.
- Das Bewusstsein der Pferdehalter ist zu schärfen: die Salz-Verabreichung soll je nach Arbeitseinsatz der Pferde erfolgen und nicht zur Standardfütterung gehören.
- Möglichkeiten sind zu erarbeiten, wie der Salzgehalt im Pferdemist reduziert werden kann.
- Kostengünstige Katalysatoren sind zu evaluieren, die das Dioxin in den Abgasen reduzieren können.



Müllereiabfälle

Die Analyseergebnisse zeigen, dass der untersuchte Gerstenabgang ähnlich hohe Stickstoffgehalte (2%) wie Pferdemist-Einstreu aufweist. So sind dann auch die Stickoxidemissionen erhöht. Im Vergleich zu Pferdemist-Einstreu ist der Chlorgehalt um Faktor 2-3, der Eisengehalt um Faktor 10 tiefer, weshalb keine Dioxin-Emissionen über dem Grenzwert zu erwarten sind.

Die Analyse der Pflanzenkohlequalität zeigt, dass alle Grenzwerte klar eingehalten werden. Ausser beim Kohlenstoffgehalt können Müllereiabfälle die höchste Pflanzenkohlequalität «EBC-Futter» erreichen (s. Tabelle 9 und Anhang 11.1).

Aufgrund dieser Ergebnisse sollen Müllereiabfälle im Feldversuch weiter untersucht werden. Dabei soll – wie im Abschnitt 3.2.1 bereits erläutert – als Substrat anstelle Gerstenabgang Weizenkleie untersucht werden. Vorteile der Weizenkleie gegenüber Gerstenabgang:

- Die Kleie trägt 42% zum gesamten Müllereiabfall-Potenzial bei, Gerstenabgang nur 10%;
- Die Kleie fällt in wenigen grossen Weichweizenmühlen an, der Gerstenabgang bei eher kleineren Hartweizenmühlen;
- Die Kleie hat gegenüber Gerstenabgang jeweils rund halb so hohe Chlor-, Eisen-, Kupfer- und Blei-gehalte (s. Anhang 11.3). Dies führt zu einem tieferen Dioxin-Erwartungswert;
- Kleie enthält wenige (resp. kaum) Stärke im Vergleich zum Gerstenabgang und eignet sich noch weniger als Futtermittel als der Gerstenabgang (der Stärkegehalt von Kleie kann jedoch von Mühle zu Mühle variieren).

Einzig beim Stickstoffgehalt liegt die Kleie mit 2.9% rund 50% höher als der Gerstenabgang und hat den höchsten Gehalt aller untersuchten Substrate. Die Stickoxidemissionen würden den NO_x-Massenstrom-Grenzwert von 2'500 g pro Stunde jedoch erst bei einer Anlagennennleistung von rund 1'500 kW thermisch überschreiten. Doch vorbeugend wird empfohlen, die Pyrolyseanlagen beim Einsatz nicht-holziger Substrate mit einem N-Katalysator auszurüsten.

Kaffeeabfälle

Die Analyseergebnisse des Ausgangssubstrates zeigen, dass Kaffeeröstabfälle die etwa gleich hohen Stickstoffgehalte wie Kleie aufweisen und entsprechend sehr hohe Stickoxidemissionen aufweisen. Der Chlor- und Eisengehalt ist dagegen sehr tief und es ist mit keinerlei Dioxin-Emissionen zu rechnen. Dagegen ist der Schwefelgehalt mit 0.23 Gew% von allen Substraten am höchsten.

Die Analyse der Pflanzenkohlequalität zeigt, dass fast alle Grenzwerte klar eingehalten werden und «EBC-AgroBio» erreicht werden könnte, wenn nicht der Kupfergehalt unerklärlicherweise den EBC-AgroBio-Grenzwert deutlich übersteigen würde und nur «EBC-Rohstoff» zulässt (s. Tabelle 9 und Anhang 11.1). Unerklärlich ist dieser Kupfergehalt, weil er nur bei diesem Kohlesubstrat so hoch ausfällt, jedoch im Ausgangssubstrat im Vergleich zu den übrigen Substraten im Mittelfeld liegt (s. Anhang 11.3). Andere Quellen (Gottstein et al. 2021) hingegen weisen für Kaffeeabfälle relativ hohe Kupfergehalte aus, welche die gemessenen Kupfergehalte in der Pflanzenkohle erwarten lassen (Seite 86). Hingegen ist der Kaliumgehalt mit ca. 9% sehr hoch und würde mit der Kohle in den Boden zurückgeführt (s. Anhang 11.8), weshalb Kaffeeabfälle z.T. auch als Dünger empfohlen wird¹⁰.

¹⁰ www.agrostim.de/produkte/duenger



Rinde

Die Analyseergebnisse des Ausgangssubstrates zeigen, dass HolZRinde sehr ähnliche Gehalte wie Holz aufweist. Erwartungsgemäss ist der Asche- und der Stickstoffgehalt höher (Faktor 2 resp. 4). Letzterer wirkt sich etwas ungünstig auf die Stickoxidemissionen aus. Die Schwefeldioxidemissionen liegen zwar minim über dem Grenzwert für Abfallverbrennung, doch bei Rinde als naturbelassener Holzbrennstoff ist dieser Grenzwert nicht massgebend.

Die Analyse der Pflanzenkohlequalität zeigt, dass fast alle Grenzwerte klar eingehalten werden und «EBC-AgroBio» erreicht werden könnte. Einzig der Kupfergehalt ist leicht über diesem Grenzwert, erfüllt jedoch «EBC-Futter». Da auch der Kohlenstoffgehalt über 80% liegt, kann mit der Rinde als einziges der untersuchten Substrate «EBC-Futter» erreicht werden (s. Tabelle 9 und Anhang 15.3).

Aufgrund dieser klaren Ergebnisse soll Rinde im Feldversuch weiter untersucht werden.

Holz-Vergärung

Die Analyseergebnisse des Ausgangssubstrates zeigen, dass Holz aus der Vergärung sehr hohe Chlor- und Eisengehalte vergleichbar mit Pferdemist-Einstreu aufweist. Entsprechend sind die PCDD/F-Konzentrationen im Abgas deutlich über dem Grenzwert für Abfallverbrennung; im Vergleich zur Pferdemist-Einstreu 50% höher und 3-fach über dem Grenzwert. Ebenso werden die höchsten Schwefeldioxidemissionen gemessen, welche den Grenzwert für Abfallverbrennung um mehr als das 4-fache überschreiten.

Die Analyse der Pflanzenkohlequalität zeigt, dass alle Grenzwerte klar eingehalten werden und «EBC-AgroBio» erreicht wird. Hingegen führen die hohen mineralischen Verunreinigungen durch Sand und Erde zum tiefsten Kohlenstoffgehalt (55.4%) aller untersuchten Substrate (s. Tabelle 9 und Anhang 15.3). Damit hat diese Kohle die geringste Sequestrier- und Adsorptionsleistung.

Aufgrund dieser Ergebnisse wird Holz aus der Vergärung (dominiert von der Fraktion «Siebrückstand braun») in diesem Forschungsprojekt nicht mehr weiter untersucht. Da das Interesse der Vergärungsanlagenbetreiber an alternativen Verwertungen jedoch sehr gross und das energetische Gesamtpotenzial beachtlich ist, ist dieses Substrat dennoch interessant. Folgende Fragestellungen sind jedoch zu untersuchen:

- Woher stammen die hohe Chlorgehalte? Sind in den durchschnittlich 2% Kunststoffrückständen allenfalls doch noch chlorierte Verbindungen (PVC) enthalten?
- In der heute häufig praktizierten Co-Verbrennung der holzigen Gärreste entstehen auch Dioxine. Kann die These erhärtet werden, dass bei der Pyrolyse systematisch weniger Dioxin entsteht?
- Kostengünstige Katalysatoren sind zu evaluieren, die das Dioxin in den Abgasen reduzieren können (s. auch Anhang 11.6);
- Bei der heute häufig praktizierten Ausbringung der holzigen Gärreste auf Landwirtschaftsland wird Stickstoff gezehrt und Mikroplastik in den Boden verbracht. Wiegen da möglicherweise die Dioxinemissionen bei der Pyrolyse weniger schwer? Dies könnte eine Ökobilanz erhellen.



Holz-Kompostierung

Die Analyseergebnisse des Ausgangssubstrates zeigen, dass Holz aus der Kompostierung zwar nur halb so hohe Chlorgehalte wie Holz aus der Vergärung aufweist jedoch vergleichbar hohe Eisengehalte. Es könnten daher durchaus grenzwertige Dioxinemissionen auftreten. Diese wurden jedoch aus Kostengründen nicht gemessen. Die Schwefeldioxidemissionen sind trotz doppelt so hoher Gehalte im Ausgangssubstrat weniger als halb so hoch wie beim Holz aus der Vergärung. Die Stickoxidemissionen sind die tiefsten aller untersuchten Substrate.

Die Analyse der Pflanzenkohlequalität zeigt, dass alle Grenzwerte klar eingehalten werden und «EBC-Agro» erreicht wird. Einzig der Kupfergehalt ist leicht erhöht und überschreitet den strengeren Grenzwert für «EBC-AgroBio». Etwas weniger als beim Holz aus der Vergärung führen die mineralischen Verunreinigungen durch Sand und Erde zu einem relativ tiefen Kohlenstoffgehalt von 63.5% (s. Tabelle 9 und Anhang 15.3).

Aufgrund dieser Ergebnisse soll Holz aus der Kompostierung im Feldversuch (AP 4) weiter untersucht werden. Den Dioxin-Emissionen gilt dabei ein besonderes Augenmerk.



4 AP 4: Pyrolyseversuche auf zwei kommerzielle Anlagen

4.1 Vorgehen und Methode

Ziel des Arbeitspakets 4 ist es, einige der zuvor in einer Laboranlage getesteten Substrate (AP 3) in einer kommerziellen Pyrolyseanlage zu testen. Insgesamt wurden drei Substrate ausgewählt und getestet: (i) Rinde, (ii) Weizenkleie und (iii) Kaffeeabfälle. Die Eignung dieser Materialien als Ausgangsmaterial für die Pflanzenkohleproduktion wurde anhand von Abgasmessungen und anhand der Pflanzenkohlequalität beurteilt. Zudem wurden die Ergebnisse der Feldversuche mit denen der Laborversuche verglichen.

4.1.1 Beschreibung der kontinuierliche Industrie-Anlage der Firma Pyreg GmbH

Die Pyreg GmbH ist mit Ihren Pyrolyseanlagen zur Heiz-/Prozesswärme- und Pflanzenkohleproduktion seit 2010 am Markt. Derzeit (November 2021) sind zwei Anlagengrößen im Angebot mit Heiznennleistungen von 150 kW (Standard) und 700 kW (Industrie, 1'500 kW Inputleistung). Die Industrie-Anlage der IWB in Basel wurde für vorliegende Versuche eingesetzt. Im Funktionsbild unten sind die Komponenten der Anlage schematisch dargestellt und werden im Folgenden beschrieben:

Beim Pyrolyseprozess werden z.B. Holzhackschnitzel mit max. 35% Wassergehalt aus einem **Vorbehälter (A)** mittels **Förderschnecke (B)** über eine Zellradschleuse kontinuierlich in das **Reaktorrohr (C)** befördert und dort bei maximal 650 °C unter Sauerstoffausschluss kontinuierlich getrocknet, aufgeheizt und entgast (pyrolysiert). Die Pyrolysegase (H₂, CH₄, CO, längerkettige Kohlenwasserstoffe) werden in den nachgeschalteten **FLOX®-Brenner (D)** geleitet. Dort werden sie vollständig verbrannt. Die heissen Rauchgase beheizen im Anschluss einerseits das Reaktorrohr, andererseits wird die grösstenteils überschüssige Energie im heissen Abgas in einem nachgeschalteten **Wärmetauscher (E)** auf das Heizwasser übertragen. Das abgekühlte Abgas verlässt das **Kamin (F)** mit rund 160°C. Die Pflanzenkohle verlässt den Reaktor über eine weitere Zellradschleuse und wird mittels wassergekühlter Schnecke ins **Kohlelager (G)** befördert und bei einer Temperatur von maximal 60°C abgelagert. Optional kann die Anlage mit einem **Kohlestaubfilter (H)** vor Eintritt in den FLOX®-Brenner und einer **Abgaswäsche (I)** ausgerüstet werden.

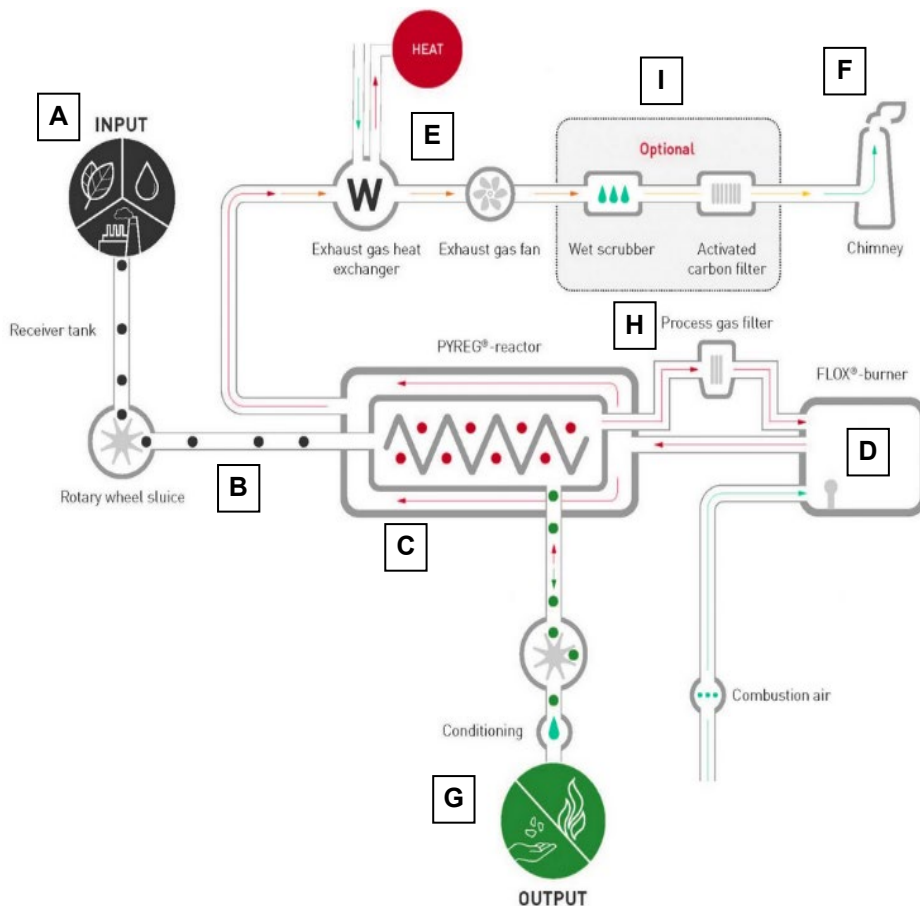


Abbildung 5: Funktionsbild der 1'500 kW-Pyrolyseanlage von Pyreg (Pyreg GmbH 2022).

4.1.2 Beschreibung der Batch-Anlage PyroFarm der Firma Kaskad-E GmbH

Bei der PyroFarm-Anlage Typ P40 der Kaskad-E GmbH handelt es sich um eine halbautomatisch beschickte Pyrolyseanlage, die im Batch halbautomatisch betrieben wird. Sie arbeitet nach dem TLUD-Prinzip (Top Lit Updraft) – der Brennstoff wird von oben gezündet und die Primärluft strömt von unten durch den Brennstoff nach oben in die Pyrolysezone, wo die Pyrolysegase entstehen. Die Sekundärluft für den vollständigen Ausbrand der Pyrolysegase wird im Brenner zugeführt. Sie stellt neben Heizwärme auch Pflanzenkohle her. Ein Batch dauert je nach Brennstoffzusammensetzung und -feuchte zwischen 3.5 und 8 Stunden und wandelt ca. 70 kg TS Holzhackschnitzel in rund 160 kWh Nutzwärme sowie in 16 kg Pflanzenkohle um. Die erste Testanlage auf einem landwirtschaftlichen Betrieb in Stettlen – seit November 2020 in Betrieb - wurde für vorliegende Versuche eingesetzt.

Im Funktionsbild unten sind die Komponenten der Anlage schematisch dargestellt und werden im Folgenden beschrieben:

Vor der manuellen Zündung der Anlage wird z.B. Holzhackschnitzel mit max. 35% Wassergehalt mittels Förderschnecke in den **Biomassebehälter (A)** befördert. Dieser Behälter enthält die gesamte Biomasse eines Batchs (360 Liter). Der Behälter ist gleichzeitig auch Pyrolysereaktor, in welchem der Pyrolyseprozess nach der manuellen Zündung von oben während eines Batchs durch kontinuierliche Zugabe von wenig Primärluft von oben nach unten erfolgt. Die entstehenden Pyrolysegase strömen aus



dem Biomassebehälter in die **Brennkammer (B)**, wo sie unter Zugabe von Sekundärluft bei rund 800°C vollständig verbrannt werden. Im **Wärmetauscher (C)** wird die Wärmeenergie der Abgase im Gegenstrom auf das Heizungswasser übertragen. Das **Abgasgebläse (D)** sorgt für den nötigen Unterdruck in Brennstoffbehälter und Brennkammer und saugt Primärluft und Sekundärluft an. Mit Hilfe der Primärluftklappe und der Lambdasonde wird die Primärluftzufuhr geregelt und damit die Abgasqualität optimiert.

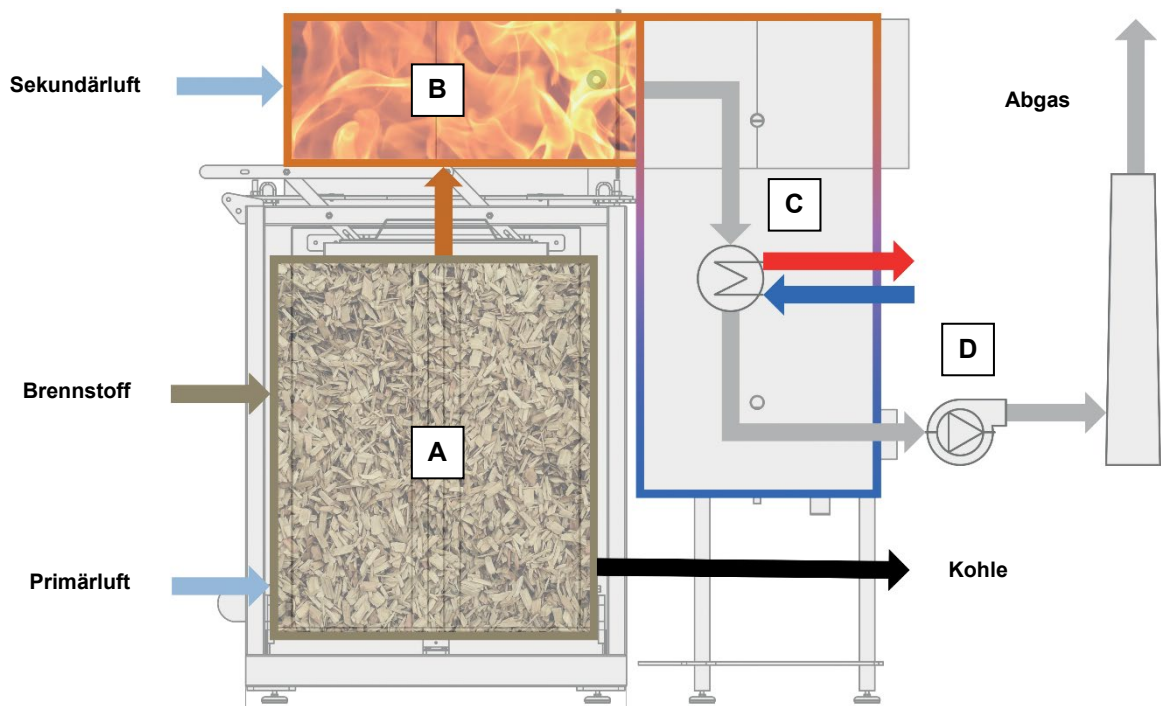


Abbildung 6: Funktionsbild der Anlage PyroFarm mit Bezeichnung der wesentlichen Komponenten.



4.1.3 Durchführung Feldversuche

Insgesamt wurden 4 Versuche zwischen dem 14. und 23. September 2021 durchgeführt. Tabelle 10 gibt einen allgemeinen Überblick über die durchgeführten Versuche.

Tabelle 10: 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

Der erste Versuch fand am 14.09.2021 unter Verwendung von Rinde als Ausgangsmaterial in der Pyreg-Anlage statt. Der Versuch wird im Folgenden als "Rinde-Pyreg" bezeichnet.

Der zweite Versuch sollte ursprünglich in der gleichen Anlage mit dem Ausgangsmaterial «Holz-Kompostierung» durchgeführt werden. Der gelieferte Rohstoff wies jedoch einen hohen Anteil an grossen Steinen auf, was seine Verwendung in der Pyreg-Anlage verhinderte. Aus diesem Grunde wurde die Untersuchung dieses Ausgangsmaterials nicht weiterverfolgt.

Auch die Weizenkleie konnte in der Pyreg-Anlage nicht getestet werden. Es wurde befürchtet, dass ein hoher Gehalt an Kalium den Filter der Anlage beschädigen könnte. Der zweite Versuch wurde daher am 17.09.2021 mit Weizenkleie als Ausgangsmaterial in der PyroFarm-Anlage durchgeführt. Das Ausgangsmaterial wurde in pelletierter Form angeliefert. Der Versuch wird im Folgenden als "Weizenkleie-PyroFarm" bezeichnet.

Der dritte Versuch wurde am 22.09.2021 mit den Kaffeeabfälle in der PyroFarm-Anlage durchgeführt. Die Abfälle aus der Kaffeerösterei wurden in pelletierter Form geliefert. Der Versuch wird im Folgenden als "Kaffeeabfälle-PyroFarm" bezeichnet.

Der vierte Versuch wurde am 23.09.2021 mit Rinde als Ausgangsmaterial auf der PyroFarm durchgeführt. Das Substrat war das gleiche wie in Versuch 1. Dieser vierte Versuch ermöglicht es, ein Substrat zu haben, das auf allen drei untersuchten Anlagen (PyroTube, Pyreg, PyroFarm) getestet wurde. Der Versuch wird im Folgenden als "Rinde-PyroFarm" bezeichnet.



4.1.4 Abgasmessung der Pyrolysegasverbrennung

In Tabelle 11 sind die durchgeführten Abgasmessungen sowie die verwendeten Messprinzipien und Geräte zusammengestellt.

Tabelle 11: Übersicht der gemessenen Parameter im Abgas

Parameter	Messprinzip	Messgerät / Methode
Sauerstoff (O ₂)	elektrochemisch	Gas-Analysator MRU Varioluxx
Kohlendioxid (CO ₂)	NDIR ^a	Gas-Analysator MRU Varioluxx
Stickoxide (NO _x)	elektrochemisch	Gas-Analysator MRU Varioluxx
Schwefeloxide (SO ₂)	elektrochemisch	Gas-Analysator MRU Varioluxx
Kohlenmonoxid (CO)	NDIR ^a	Gas-Analysator MRU Varioluxx
Methan (CH ₄)	NDIR ^a	Gas-Analysator MRU Varioluxx
Staub	gravimetrisch	Out-Stack-Filtergerät mit Planfilter
Polychlorierte Dibenzodioxine/ -furane (PCDD/F)	GC-HRMS	Gekühltes-Absaugrohr-Methode
Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)	GC-HRMS	Gekühltes-Absaugrohr-Methode

^a Nichtdispersive Infrarot-Photometrie

Die Staubbmessungen wurden in Anlehnung an EN 13284-1:2017 durchgeführt. Der PCDD/F- und PAK-Messung liegt die EN-Norm 1948 zugrunde. Für die Probenahme wurde die "Gekühltes-Absaugrohr-Methode" gemäss EN 1948-1 Anhang B.7 gewählt. Die Proben (Kondensat und Filter) wurden an ein externes Labor zur Analyse gesendet. Die PCDD/F-Ergebnisse werden als Toxizitätsäquivalent (I-TEQ) angegeben. Die PAK-Ergebnisse werden als Summe von 16 PAK angegeben, wie von der US-Umweltschutzbehörde vorgeschlagen ($\Sigma 16$ EPA PAK). Alle Ergebnisse (ausser O₂ und CO₂) beziehen sich auf einen Sauerstoffgehalt im Abgas von 13 %. Normkubikmeter (Nm³) ist auf die Normbedingungen von 273 K und 1'013 mbar bezogen.

4.1.5 Analysen der Pflanzenkohle

Die Pflanzenkohle-Proben wurden nach dem EBC-Basic Analysepaket (Stand 2021) analysiert¹¹. Die im EBC definierten Zertifizierungsklassen werden als Referenz für die Bewertung der Pflanzenkohle verwendet (EBC 2012-2022) (Version 10.1). Nach jedem Versuch wurde eine ca. 3-kg-Probe der hergestellten Pflanzenkohle entnommen. Die Probe wurde 24 Stunden lang bei 105 °C getrocknet und in einem Mischer zerkleinert. Die Probe wurde zur Analyse an ein externes Labor geschickt. Für eine bessere Lesbarkeit werden nur die Eigenschaften von Pflanzenkohle, die als besonders relevant angesehen werden, in den Bericht eingebracht. Die Eignung der Pflanzenkohle zur Einordnung in die EBC-Klassen erfolgt auf der Grundlage der hier durchgeführten Analyse. Ein Zertifizierungsprozess ist jedoch notwendig, um eine abschliessende Klassifizierung der Pflanzenkohle in EBC-Klassen vorzunehmen.

¹¹ Keine EBC-Zertifizierung



4.2 Ergebnisse und Diskussion

4.2.1 Abgasemissionen bei dem Feldversuch

Versuch 1: Rinde-Pyreg

Abbildung 7 zeigt den Verlauf der Konzentration von O_2 , CO_2 , NO_x , SO_2 und CO im Abgas.

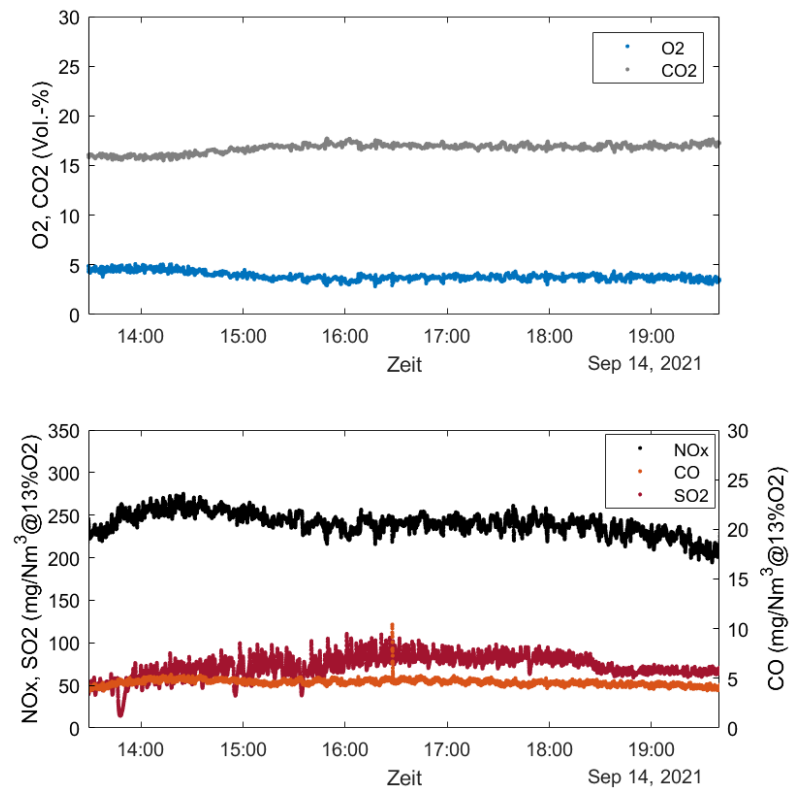


Abbildung 7: Verlauf der Konzentration von O_2 , CO_2 , NO_x , SO_2 und CO im Abgas des Versuchs 1 «Rinde-Pyreg»



Tabelle 12: Ergebnisse der Abgasmessung von Versuch 1

Parameter		Einheit	Messwerte
O ₂		Vol.-%	3.9
CO ₂		Vol.-%	16.8
NO _x		mg/Nm ³	240
SO ₂		mg/Nm ³	72
CO		mg/Nm ³	5
CH ₄		mg/Nm ³	3
Staub (n=4)		mg/Nm ³	5.9
PCDD/F	inkl. BG	ng/Nm ³	0.00085
	exkl. BG	ng/Nm ³	0.00002
Σ16 EPA PAK	inkl. BG	mg/Nm ³	0.00013
	exkl. BG	mg/Nm ³	0.00012

BG: Bestimmungsgrenze

Beim Pyrolyseversuch von Rinde auf der Pyreg-Anlage erwiesen sich die Emissionswerte im Abgas während der gesamten Messung als sehr stabil. Zu beachten ist, dass die Anlage vor Beginn der Messungen bereits mehrere Stunden in Betrieb war, was sowohl für die Stabilität des Pyrolyseprozesses als auch für die Verbrennung der Pyrolysegas von Vorteil ist.

Die NO_x- und SO₂-Emissionen lagen während des Messzeitraums bei einem Durchschnittswert von 240 mg/Nm³ bzw. 72 mg/Nm³. Diese Emissionen sind auf den höheren Gehalt an Stickstoff (Faktor 2 bis 3 im Vergleich zu Stammholz) und Schwefel (Faktor 4 bis 8 im Vergleich zu Stammholz) in der Rinde zurückzuführen.

Die gemessenen CO- und CH₄-Emissionen liegen mit 5 bzw. 3 mg/Nm³ auf einem sehr niedrigen Niveau.

Das Ergebnis der Staub-Messung beträgt 5.9 mg/Nm³ und entspricht dem Mittelwert von 4 Probenahmen (n=4 Planfilter) verteilt über die gesamte Messzeit. Diese niedrige Partikelkonzentration lässt sich unter anderem durch das Vorhandensein eines Filters zur Filterung von Staubpartikeln im Pyrolysegas zwischen dem Pyrolysereaktor und dem Brenner erklären.

Bei den Emissionen von PCDD/F lagen 15 von 17 PCDD/F-Verbindungen unter der angegebenen Bestimmungsgrenze (BG), was den hohen Unterschied zwischen dem Wert inklusiv und exklusiv BG erklärt. Die Ergebnisse der PCDD/F-Emissionen lagen daher weit unter dem für Abfall geltenden Grenzwert von 0.1 ng/Nm³ gemäss LRV Anhang 2 Ziffer 714.

Auch bei den PAK-Emissionen zeigen die Ergebnisse einen sehr niedrigen Wert. Zum Vergleich: Diese Werte liegen in der Grössenordnung einer Studie, bei der Holz/Laub und Altholz unter ähnlichen Bedingungen pyrolysiert wurden (PAK-Konzentrationen von 0.0002-0.0004 mg/Nm³) (Sørmo et al. 2020).



Versuch 2: Weizenkleie-PyroFarm

Abbildung 8 zeigt den Verlauf der Konzentration von O_2 , CO_2 , NO_x , SO_2 und CO im Abgas. Im Gegensatz zu Versuch 1, bei dem die Messungen bei laufender Anlage gestartet wurden, wurden bei Versuch 2 die Messungen und der Betrieb der Anlage gleichzeitig gestartet. Der Start ist dadurch gekennzeichnet, dass es sich um eine instabile Periode handelt, in der die Emissionen, wenn möglich, getrennt interpretiert werden sollten. Der graue Bereich in Abbildung 8 zeigt den Zeitraum, der als instabil definiert wurde und als Phase I bezeichnet wird. Phase II (weisser Hintergrund) entspricht dem Zeitraum, in dem die Anlage unter stabilen Betriebsbedingungen lief.

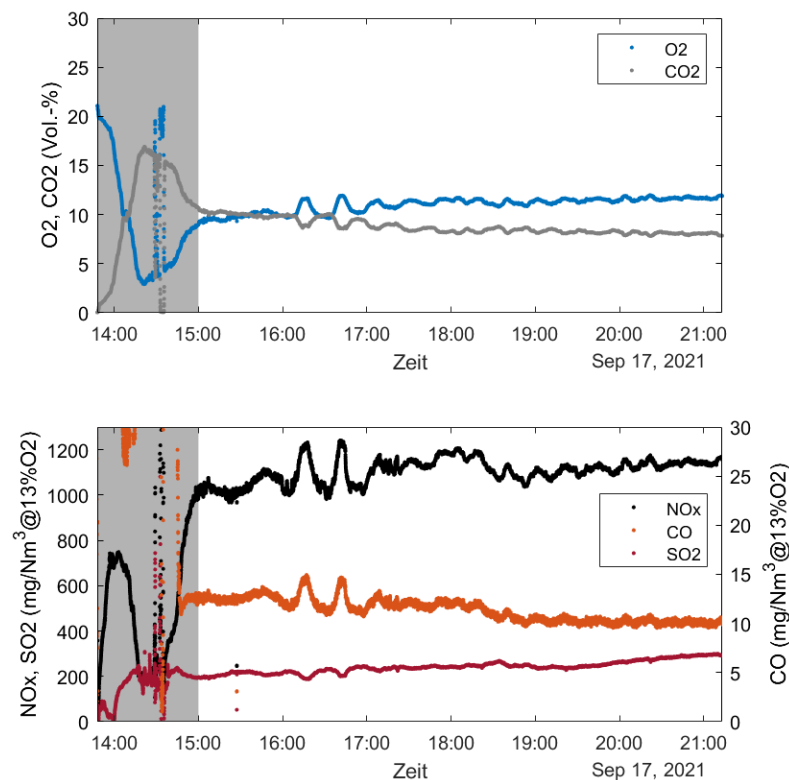


Abbildung 8: Verlauf der Konzentration von O_2 , CO_2 , NO_x , SO_2 und CO im Abgas des Versuchs 2 «Weizenkleie-PyroFarm»



Tabelle 13: Ergebnisse der Abgasmessung von Versuch 2 «Weizenkleie-PyroFarm»

Parameter		Einheit	Messwerte
O ₂		Vol.-%	11.0
CO ₂		Vol.-%	8.8
NO _x		mg/Nm ³	1'103
SO ₂		mg/Nm ³	240
CO		mg/Nm ³	11
CH ₄		mg/Nm ³	5
Staub (n=3)		mg/Nm ³	9.1
PCDD/F	inkl. BG	ng/Nm ³	0.00599
	exkl. BG	ng/Nm ³	0.00242
Σ16 EPA PAK	inkl. BG	mg/Nm ³	0.138
	exkl. BG	mg/Nm ³	0.138

BG: Bestimmungsgrenze

Alle gemittelten Messwerte ausser PCDD/F und PAK beziehen sich nur auf Phase II. In Phase II lagen die NO_x- und SO₂-Emissionen bei einem Durchschnittswert von 1'103 mg/Nm³ bzw. 240 mg/Nm³. Die gemessenen CO- und CH₄-Emissionen lagen mit 11 bzw. 5 mg/Nm³ auf einem sehr niedrigen Niveau. Das Ergebnis der Staub-Messung beträgt 9.1 mg/Nm³ und entspricht dem Mittelwert von 3 Messungen verteilt über Phase II.

Bei den Emissionen von PCDD/F lagen 11 von 17 PCDD/F-Verbindungen unter der angegebenen Bestimmungsgrenze (BG), was den Unterschied zwischen dem Wert inkl. und exkl. BG erklärt. Bei der Messung von PCDD/F und PAK wird die Inbetriebnahme der Anlage (Phase I) im Messwert berücksichtigt. Es gibt Hinweise darauf, dass mindestens 30 Gew.-% der PCDD/F der ersten Stunde zuzuordnen sind. In der Studie von Sørmo et al. (2020) wurde beobachtet, dass höhere PAK-Emissionen mit höheren Partikelemissionen im Abgas einhergingen, was darauf hindeutet, dass es sich bei den PAK-Emissionen hauptsächlich um partikelgebundene PAK handelte. Die gemessenen hohen Staubemissionen (bis zu 66 mg/Nm³) in Phase I könnten also den höheren PAK-Wert erklären.



Versuch 3: Kaffeeabfälle-PyroFarm

Abbildung 9 zeigt den Verlauf der Konzentration von O_2 , CO_2 , NO_x und CO im Abgas. Ähnlich wie bei Versuch 2 ist der Start durch eine instabile Periode gekennzeichnet, für welche die Emissionen, wenn möglich, getrennt betrachtet werden müssen. Der graue Bereich in Abbildung 9 zeigt den Zeitraum, der als instabil definiert wurde und als Phase I bezeichnet wird. Phase II (weisser Hintergrund) entspricht dem Zeitraum, in dem die Anlage unter stabilen Betriebsbedingungen lief.

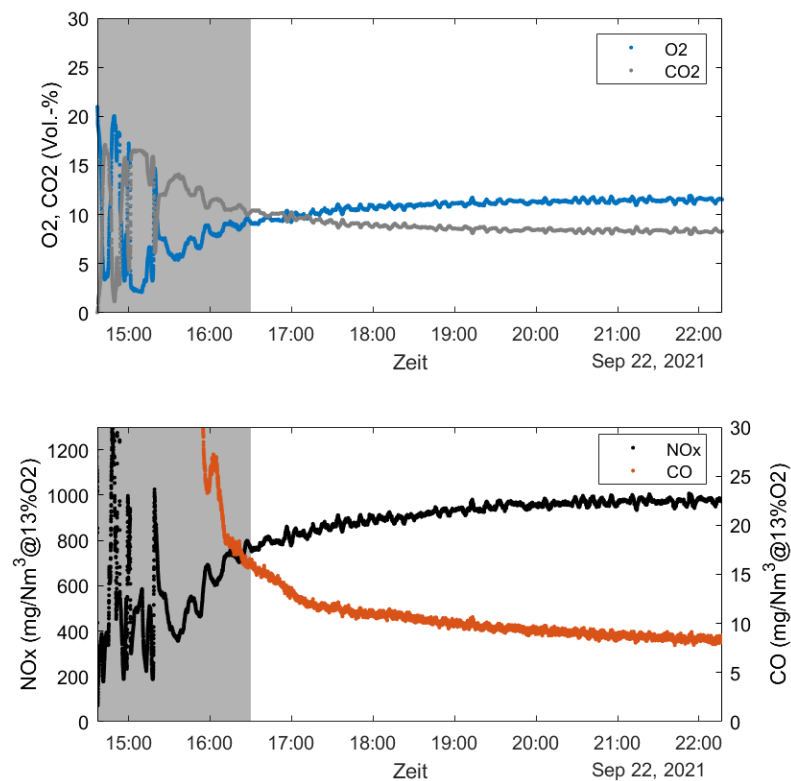


Abbildung 9: Verlauf der Konzentration von O_2 , CO_2 , NO_x und CO im Abgas des Versuchs 3 «Kaffeeabfälle-PyroFarm»



Tabelle 14: Ergebnisse der Abgasmessung von Versuch 3 «Kaffeeabfälle-PyroFarm»

Parameter		Einheit	Messwerte
O ₂		Vol.-%	11.0
CO ₂		Vol.-%	8.8
NO _x		mg/Nm ³	917
SO ₂		mg/Nm ³	n.g.
CO		mg/Nm ³	10
CH ₄		mg/Nm ³	14
Staub (n=2)		mg/Nm ³	23.1
PCDD/F	inkl. BG	ng/Nm ³	0.00401
	exkl. BG	ng/Nm ³	0.00269
Σ16 EPA PAK	inkl. BG	mg/Nm ³	0.871
	exkl. BG	mg/Nm ³	0.871

n.g.: nicht gemessen

BG: Bestimmungsgrenze

Alle gemittelten Messwerte ausser PCDD/F und PAK beziehen sich nur auf Phase II. In Phase II lagen die NO_x-Emissionen bei einem Durchschnittswert von 917 mg/Nm³. Die gemessenen CO- und CH₄-Emissionen liegen mit 10 bzw. 14 mg/Nm³ auf einem sehr niedrigen Niveau. Das Ergebnis der Staub-Messung beträgt 23.1 mg/Nm³ und entspricht dem Mittelwert von 2 Messungen verteilt über Phase II. Dieser Wert liegt leicht über dem Wert von 20 mg/Nm³, der in der LRV Anhang 2 Ziffer 742 angegeben ist. Bei den Emissionen von PCDD/F lagen 11 von 17 PCDD/F-Verbindungen unter der angegebenen Bestimmungsgrenze (BG), was den Unterschied zwischen dem Wert inkl. und exkl. BG erklärt. Die durchschnittlich höhere Partikelkonzentration der Phase II und die Einbeziehung eines Teils der Phase I in die Messung der PAK könnte, ähnlich wie bei Versuch 2, zu einem hohen Anteil an partikelgebundener PAK geführt haben. Aufgrund der hohen Startemissionen wurde der SO₂-Sensor überlastet und fiel in der Folge aus.

Versuch 4: Rinde-PyroFarm

Der Rindenmulch war aufgrund der Aufbereitung in der Pyreg-Anlage tags zuvor sehr feinkörnig. Dadurch bestand die Gefahr, dass eine volle Schüttung in PyroFarm einen zu hohen Strömungswiderstand für einen standardmässigen Betrieb verursacht. Daher wurde nur die obere Hälfte des Batchs mit Rindenmulch befüllt, die untere Hälfte bestand aus Holzhackschnitzeln. Die nachfolgende Abbildung 10 zeigt den Verlauf der Konzentration von O₂, CO₂, NO_x und CO im Abgas. Der graue Bereich von 6:00 bis 6:58 Uhr in Abbildung 10 zeigt den Zeitraum, der als instabil definiert wurde und als Phase I bezeichnet wird. Phase II (weisser Hintergrund) entspricht dem Zeitraum, in dem die Anlage unter stabilen Betriebsbedingungen lief. Ab 7:22 Uhr (Phase III) wechselt die Zersetzungsfront auf Holzhackschnitzel im unteren Teil des Batchs. Die NO_x-Emissionen wurden als Indikator für den Übergang von Rinde auf Holzhackschnitzel verwendet.

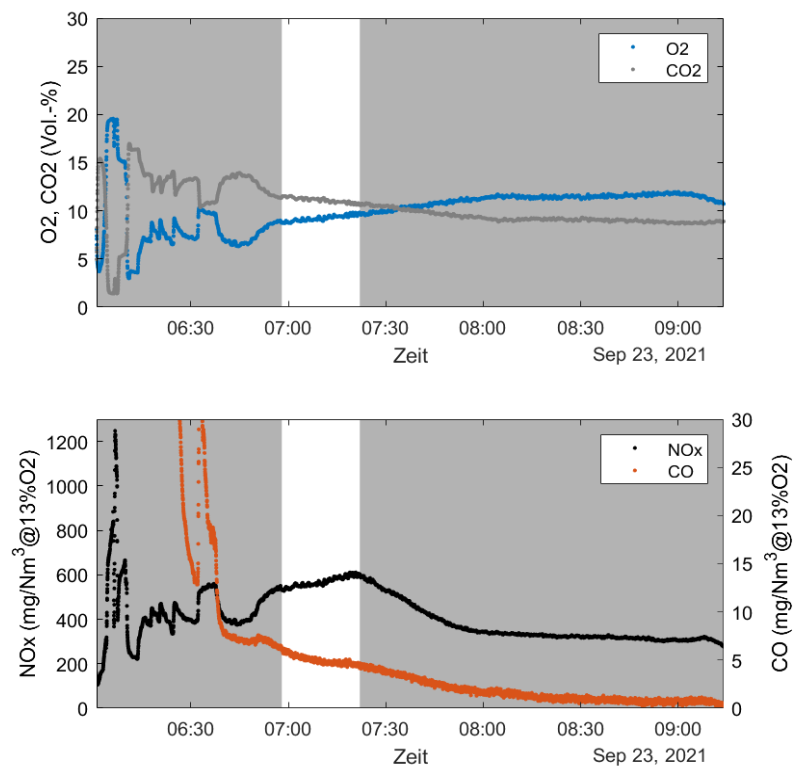


Abbildung 10: Verlauf der Konzentration von O₂, CO₂, NO_x und CO im Abgas des Versuchs 4 «Rinde-PyroFarm»

Tabelle 15: Ergebnisse der Abgasmessung von Versuch 4 «Rinde-PyroFarm»

Parameter		Einheit	Messwerte
O ₂		Vol.-%	9.3
CO ₂		Vol.-%	11.0
NO _x		mg/Nm ³	572
SO ₂		mg/Nm ³	n.g.
CO		mg/Nm ³	5
CH ₄		mg/Nm ³	12
Staub		mg/Nm ³	n.g.
PCDD/F	inkl. BG	ng/Nm ³	n.g.
	exkl. BG	ng/Nm ³	n.g.
Σ16 EPA PAK	inkl. BG	mg/Nm ³	n.g.
	exkl. BG	mg/Nm ³	n.g.

n.g.: nicht gemessen

BG: Bestimmungsgrenze



In Phase II lagen die NO_x-Emissionen bei einem Durchschnittswert von 572 mg/Nm³. Im Vergleich dazu lagen die NO_x-Emissionen während der Pyrolyse von Holzhackschnitzel (Phase III) bei 368 mg/Nm³. Die Werte der NO_x-Emissionen für den Versuch mit Rinde auf PyroFarm im Vergleich zu den auf Pyreg und dem ebenfalls erhöhten Wert mit Holzhackschnitzel auf Pyrofarm deuten darauf hin, dass eine Reduzierung der NO_x-Emissionen möglich ist. Dies könnte mit einem weiter entwickelten Brenner erreicht werden.

Die gemessenen CO- und CH₄-Emissionen liegen mit 5 bzw. 12 mg/Nm³ auf einem sehr niedrigen Niveau.

4.2.2 Eigenschaften der Pflanzenkohle

Versuch 1: Rinde-Pyreg

Ein Bild des Ausgangsmaterials (Rinde) und der daraus produzierten Pflanzenkohle ist in Abbildung 11 zu sehen. Die Ergebnisse der wesentlichen Parameter der Pflanzenkohlenstoffanalyse und des Vergleichs mit den Grenzwerten von allen EBC-Klassen sind in Tabelle 16 zusammengefasst.



Abbildung 11: Bild von Rinde (links) und daraus produzierter Pflanzenkohle (rechts)

Basierend auf den vom EBC definierten Standard (EBC 2012-2022) (Version 10.1) erfüllen zwei der gemessenen Parameter in der Pflanzenkohle aus Rinde nicht die Grenzwerte aller EBC-Klassen. Werden beide Parameter getrennt betrachtet, erfüllt die Pflanzenkohle einerseits durch den Zinkgehalt von 271 mg/kg die Anforderung für EBC-Futter und EBC-AgroBio nicht. Andererseits liegt der PAK-Gehalt knapp über dem Grenzwert von 4 ± 2 mg/kg, der für EBC-AgroBio festgelegt wurde. Grundsätzlich ist zwischen Schadstoffen zu unterscheiden, die ursprünglich im Ausgangsmaterial enthalten waren und in der Pflanzenkohle zurückgehalten werden (was bei den meisten Schwermetallen der Fall ist), und Schadstoffen, die während des Pyrolyseprozesses entstehen (in der Regel ist dies der Fall bei PAK).



Tabelle 16: Ergebnisse der Pflanzenkohleeigenschaften von Versuch 1 «Rinde-Pyreg»

		Messwerte	EBC Grenzwerte			
Parameter	Einheit	Rinde-Pyreg	EBC-Futter	EBC-Agrobio	EBC-Agro/Urban/ Gebrauchsmaterial	EBC-Rohstoff
Kohlenstoff (Corg)	Ma.-%	73.0	Deklaration	Deklaration	Deklaration	Deklaration
H/Corg	mol/mol	0.29	< 0.7	< 0.7	< 0.7	< 0.7
O/C	mol/mol	0.079	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Arsen (As)	mg/kg	1	2*	13	13	Deklaration
Blei (Pb)	mg/kg	5	10*	45	120	Deklaration
Cadmium (Cd)	mg/kg	< 0.2	0.8*	0.7	1.5	Deklaration
Kupfer (Cu)	mg/kg	21	70	70	100	Deklaration
Nickel (Ni)	mg/kg	13	25	25	50	Deklaration
Quecksilber (Hg)	mg/kg	< 0.07	0.1*	0.4	1	Deklaration
Zink (Zn)	mg/kg	271	200	200	400	Deklaration
Chrom (Cr)	mg/kg	16	70	70	90	Deklaration
Σ16 EPA PAK (exkl. BG)	mg/kg	7	Deklaration	4 ± 2	6.0 ± 2.2 **	Nicht erforderlich
Σ8 EFSA PAK (exkl. BG)	mg/kg	n.b.	1.0	1.0	1.0	4.0
Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthen	mg/kg	n.g.	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0

* Grenzwerte auf einer Basis von 88% des Gehalts an Trockensubstanz der Pflanzenkohle

** Grenzwert gültig für EBC-Agro

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

Der hohe Zinkgehalt in der Pflanzenkohle ist somit auf den Zinkgehalt im Ausgangsmaterial zurückzuführen. Hartmann et al. (2000) weisen auf einen Zinkgehalt von Rinde (Nadelholz) zwischen 110 und 170 mg/kg hin.

Bezüglich des PAK-Gehalts werden Faktoren wie der Reaktortyp, die Pyrolysetemperatur und die Verweilzeit als Faktoren angesehen, die einen Einfluss auf die PAK-Bildung haben (Shen et al. 2021; Sørmo et al. 2020; Lehmann and Joseph 2015). Die Mechanismen der PAK-Bildung sind jedoch nicht vollständig geklärt. Zum Vergleich: In der Studie von Sørmo et al. (2020) wurde eine PAK-Konzentration in der Pflanzenkohle zwischen 1.3 und 16.7 mg/kg festgestellt, bei der Holz/Laub und Altholz als Ausgangsmaterial verwendet wurden.



Versuch 2: Weizenkleie-PyroFarm

Ein Bild des Ausgangsmaterials (Weizenkleie) und der daraus produzierten Pflanzenkohle ist in Abbildung 12 zu sehen. Die Ergebnisse der wesentlichen Parameter der Pflanzenkohlenstoffanalyse und des Vergleichs mit Grenzwerten von allen EBC-Klassen sind in Tabelle 17 zusammengefasst.



Abbildung 12: Bild von pelletierter Weizenkleie (links) und daraus produzierter Pflanzenkohle (rechts)

Basierend auf den vom EBC definierten Standards (EBC 2012-2022) (Version 10.1), erfüllt ein der gemessenen Parameter in der Pflanzenkohle aus Weizenkleie nicht die Kriterien aller EBC-Klasse. Der Zinkgehalt von 308 mg/kg würde die Pflanzenkohle für die Klassen EBC-Futter und EBC-AgroBio ungeeignet machen. Dabei ist zu beachten, dass der $\Sigma 16$ EPA PAK-Gehalt von 4.5 mg/kg innerhalb des für EBC-AgroBio zulässigen Wertes liegt, da eine Toleranz (4 ± 2 mg/kg) angegeben ist. Darüber hinaus ist für EBC-Futter kein Grenzwert für die $\Sigma 16$ EPA PAK festgelegt, sondern eine Deklaration erforderlich. Für die $\Sigma 8$ EFSA PAK (die eine Teilmenge der $\Sigma 16$ PAK sind) ist jedoch ein Grenzwert von 1 mg/g festgelegt, der hier eingehalten wird.



Tabelle 17: Ergebnisse der Pflanzenkohleeigenschaften von Versuch 2 «Weizenkleie-PyroFarm»

Parameter	Einheit	Messwerte	EBC Grenzwerte			
		Weizenkleie-PyroFarm	EBC-Futter	EBC-Agrobio	EBC-Agro/Urban/Gebrauchsmaterial	EBC-Rohstoff
Kohlenstoff (Corg)	Ma.-%	68.8	Deklaration	Deklaration	Deklaration	Deklaration
H/Corg	mol/mol	0.17	< 0.7	< 0.7	< 0.7	< 0.7
O/C	mol/mol	0.021	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Arsen (As)	mg/kg	< 0.8	2*	13	13	Deklaration
Blei (Pb)	mg/kg	< 2	10*	45	120	Deklaration
Cadmium (Cd)	mg/kg	< 0.2	0.8*	0.7	1.5	Deklaration
Kupfer (Cu)	mg/kg	55	70	70	100	Deklaration
Nickel (Ni)	mg/kg	10	25	25	50	Deklaration
Quecksilber (Hg)	mg/kg	< 0.07	0.1*	0.4	1	Deklaration
Zink (Zn)	mg/kg	308	200	200	400	Deklaration
Chrom (Cr)	mg/kg	7	70	70	90	Deklaration
Σ16 EPA PAK (exkl. BG)	mg/kg	4.5	Deklaration	4 ± 2	6.0 ± 2.2	Nicht erforderlich
Σ8 EFSA PAK (exkl. BG)	mg/kg	n.b.	1.0	1.0	1.0	4.0
Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthen	mg/kg	n.g.	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0

* Grenzwerte auf einer Basis von 88% des Gehalts an Trockensubstanz der Pflanzenkohle

** Grenzwert gültig für EBC-Agro

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

Der hohe Zinkgehalt in der Pflanzenkohle ist auf den Zinkgehalt im Ausgangsmaterial zurückzuführen. Die Literatur weist eine grosse Bandbreite des Zinkgehalts in Weizenkleie von 23.8 bis 159.8 mg/kg auf (Wang et al. 2020). In einer anderen Studie, die in der Schweiz durchgeführt wurde, lag der Zink-Gehalt in Weizenkleie zwischen 31 und 58 mg/kg (BFE 2019). Aufgrund des breiten Konzentrationsbereichs von Zink könnte durch die Verwendung einer anderen Weizenkleie ein geringerer Zinkgehalt in der Pflanzenkohle erwartet werden.



Versuch 3: Kaffeeabfälle-PyroFarm

Das pelletierte Ausgangsmaterial (Kaffeeabfälle) und die daraus produzierte Pflanzenkohle sind in Abbildung 13 zu sehen. Die Ergebnisse der wesentlichen Parameter der Pflanzenkohlenstoffanalyse und des Vergleichs mit den Grenzwerten von allen EBC-Klassen sind in Tabelle 18 zusammengefasst.



Abbildung 13: Bild von pelletierten Kaffeeabfällen (links) und produzierter Pflanzenkohle (rechts)



Tabelle 18: Ergebnisse der Pflanzenkohleeigenschaften von Versuch 3 «Kaffeeabfälle-PyroFarm»

		Messwerte	EBC Grenzwerte			
Parameter	Einheit	Kaffeeabfälle -PyroFarm	EBC-Futter	EBC-Agrobio	EBC- Agro/Urban/ Gebrauchs- material	EBC- Rohstoff
Kohlenstoff (Corg)	Ma.-%	70.2	Deklaration	Deklaration	Deklaration	Deklaration
H/Corg	mol/mol	0.28	< 0.7	< 0.7	< 0.7	< 0.7
O/C	mol/mol	0.068	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Arsen (As)	mg/kg	< 0.8	2*	13	13	Deklaration
Blei (Pb)	mg/kg	< 2	10*	45	120	Deklaration
Cadmium (Cd)	mg/kg	< 0.2	0.8*	0.7	1.5	Deklaration
Kupfer (Cu)	mg/kg	188	70	70	100	Deklaration
Nickel (Ni)	mg/kg	8	25	25	50	Deklaration
Quecksilber (Hg)	mg/kg	< 0.07	0.1*	0.4	1	Deklaration
Zink (Zn)	mg/kg	60	200	200	400	Deklaration
Chrom (Cr)	mg/kg	12	70	70	90	Deklaration
Σ16 EPA PAK (exkl. BG)	mg/kg	0.9	Deklaration	4 ± 2	6.0 ± 2.2	Nicht erforderlich
Σ8 EFSA PAK (exkl. BG)	mg/kg	n.b.	1.0	1.0	1.0	4.0
Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthen	mg/kg	n.g.	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0

* Grenzwerte auf einer Basis von 88% des Gehalts an Trockensubstanz der Pflanzenkohle

** Grenzwert gültig für EBC-Agro

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

Basierend auf den vom EBC definierten Standards (EBC 2012-2022) (Version 10.1) übersteigt ein Parameter, die Kupferkonzentration von 188 mg/kg, der Pflanzenkohle aus den Kaffeeabfällen den Grenzwert aller EBC-Klassen ausser EBC-Rohstoff (s. Anhang 11.1): Auf der Grundlage dieses Parameters könnte die Pflanzenkohle nur für EBC-Klasse Rohstoff eingesetzt werden. In der Literatur wird ein Kupfergehalt zwischen 70 und 185 mg/kg für Kaffeehäutchen angegeben (Gottstein et al. 2021). Eine weitere Quelle spricht von 38 mg/kg¹². Aufgrund des Massenverlustes während der Pyrolyse und der damit verbundenen Aufkonzentrierung der Schwermetalle in der Pflanzenkohle (bis Faktor 3.5) ist anzunehmen, dass der Kupfergehalt dieses Ausgangsmaterials ein wiederkehrendes Problem sein wird.

¹² www.agrostim.de/produkte/duenger



Versuch 4: Rinde-PyroFarm

Das Ausgangsmaterials Rinde und die daraus produzierte Pflanzenkohle ist in Abbildung 14 zu sehen. Die Ergebnisse der wesentlichen Parameter der Pflanzenkohlenstoffanalyse und des Vergleichs mit den Grenzwerten von allen EBC-Klassen sind in Tabelle 19 zusammengefasst.



Abbildung 14: Bild von Rinde (links) und daraus produzierter Pflanzenkohle (rechts).



Tabelle 19: Ergebnisse der Pflanzenkohleeigenschaften von Versuch 4 «Rinde-PyroFarm»

		Messwerte	EBC Grenzwerte			
Parameter	Einheit	Rinde-PyroFarm	EBC-Futter	EBC-Agrobio	EBC-Agro/Urban/Gebrauchsmaterial	EBC-Rohstoff
Kohlenstoff (Corg)	Ma.-%	74.5	Deklaration	Deklaration	Deklaration	Deklaration
H/Corg	mol/mol	0.2	< 0.7	< 0.7	< 0.7	< 0.7
O/C	mol/mol	0.069	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4
Arsen (As)	mg/kg	1	2*	13	13	Deklaration
Blei (Pb)	mg/kg	2	10*	45	120	Deklaration
Cadmium (Cd)	mg/kg	< 0.2	0.8*	0.7	1.5	Deklaration
Kupfer (Cu)	mg/kg	20	70	70	100	Deklaration
Nickel (Ni)	mg/kg	11	25	25	50	Deklaration
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0.12	0.1*	0.4	1	Deklaration
Zink (Zn)	mg/kg	229	200	200	400	Deklaration
Chrom (Cr)	mg/kg	16	70	70	90	Deklaration
Σ16 EPA PAK (exkl. BG)	mg/kg	0.7	Deklaration	4 ± 2	6.0 ± 2.2	Nicht erforderlich
Σ8 EFSA PAK (exkl. BG)	mg/kg	n.b.	1.0	1.0	1.0	4.0
Benzo[e]pyren / Benzo[j]fluoranthen	mg/kg	n.g.	< 1.0	< 1.0	< 1.0	< 1.0

* Grenzwerte auf einer Basis von 88% des Gehalts an Trockensubstanz der Pflanzenkohle

** Grenzwert gültig für EBC-Agro

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

Basierend auf den vom EBC definierten Standards (EBC 2012-2022) (Version 10.1) erfüllen zwei der gemessenen Parameter in der Pflanzenkohle aus den Kaffeeabfällen nicht die Kriterien aller EBC-Klassen. Werden beide Parameter getrennt betrachtet, würde der Quecksilbergehalt (Hg) von 0.12 mg/kg die Pflanzenkohle für die EBC-Klasse Futter ungeeignet machen. Der Zinkgehalt (Zn) liegt bei 229 mg/kg und ist somit für die Klassen EBC-Futter und EBC-Agro ungeeignet.

Das Vorkommen von Quecksilber in der Pflanzenkohle (selbst in geringen Mengen) wurde nicht erwartet, da sich das meiste Quecksilber aufgrund der niedrigen Verdampfungstemperatur des Metalls während des Pyrolyseprozesses verflüchtigen würde (Brtnicky et al. 2021). Die Konzentration des Quecksilbers ist jedoch sehr niedrig und wird als unproblematisch beurteilt. Da es sich um dasselbe Substrat wie in Versuch I handelt, gelten die Feststellungen zum Zinkgehalt von Versuch 1 auch hier.



4.3 Vergleich und Beurteilung der Ergebnisse der verschiedenen Anlagen

4.3.1 Vergleich der Abgasemissionen

Tabelle 20 zeigt die Ergebnisse der Abgasmesswerte von Rinde, Weizenkleie und Kaffeeabfälle gemessen in den verschiedenen Anlagen. An der Bandbreite der Ergebnisse für ein bestimmtes Substrat ist der Einfluss der Anlage auf die Abgasemissionen erkennbar.

Tabelle 20: Ergebnisse der Abgasmessungen von Rinde, Weizenkleie und Kaffeeabfälle, die in verschiedenen Anlagen gemessen wurden

Para- meter	Grenzwert LRV Art. 74	Einheit	Rinde			Weizenkleie		Kaffeeabfälle	
			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	(250)	mg/Nm ³	363	240	572	824	1'103	610	917
Nennvolumenstrom		Nm ³ /h	17	1'500	125	17	125	17	125
NO _x -M	2'500	g/h	6	360	72	14	138	10	115
SO ₂	-	mg/Nm ³	70	72	n.g.	291	240	n.g.	n.g.
CO	500	mg/Nm ³	7	5	5	< 1	11	< 1	10
CH ₄	-	mg/Nm ³	< 1	3	12	11	5	9	14
Staub	20	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

Die NO_x-Emissionen lagen zwischen 240 und 572 mg/Nm³ für Rinde, 823 und 1'103 mg/Nm³ für Weizenkleie und 610 und 917 mg/Nm³ für die Kaffeeabfälle. Die NO_x-Konzentration, die auf der PyroFarm gemessen wurde, war etwa doppelt so hoch wie der Wert, der auf der Pyreg mit dem gleichen Ausgangsmaterial (Rinde) gemessen wurde. Es wird daher erwartet, dass die in der PyroFarm gemessenen NO_x-Emissionen das Potenzial haben, weiter gesenkt zu werden. Diese Verminderung kann durch primäre und sekundäre Massnahmen erreicht werden (Kaltschmitt, Hartmann and Hofbauer 2016). Erst ab einem Massenstrom von 2'500 g/h gilt ein Grenzwert gemäss LRV (250 mg/Nm³). Dieser Massenstrom wird sowohl bei der Pyreg- als auch bei der PyroFarm-Anlage aufgrund ihres geringen Abgasvolumenstroms weit unterschritten. Beispiel: bei PyroFarm mit ca. 125 Nm³/h ergeben sich für die kritischste NO_x-Messung von 1'103 mg/Nm³ bei Weizenkleie einen Massenstrom von 138 g/h

Die SO₂-Emissionen, soweit verfügbar, lagen zwischen 70 und 72 mg/Nm³ (Rinde) und 240 bis 291 mg/Nm³ (Weizenkleie). Diese Werte lagen somit für PyroTube und PyroFarm in der gleichen Grössenordnung. Die CO-Konzentrationen lagen zwischen 5 und 7 mg/Nm³ (Rinde), < 1 und 5 mg/Nm³ (Weizenkleie) und zwischen < 1 und 11 mg/Nm³ (Kaffeeabfälle), während die CH₄-Konzentration sich zwischen < 1 und 12 mg/Nm³ (Rinde), 5 und 11 mg/Nm³ (Weizenkleie) und 9 und 14 mg/Nm³ (Kaffeeabfälle) befand. Die CO- und CH₄-Konzentrationen werden trotz gewisser Schwankungen bei



allen Versuchen als sehr niedrig angesehen. Bei anderen Parametern wie Staub, PCDD/F und PAK gibt es nur eine Messung pro Ausgangsstoff, so dass ein Vergleich zwischen den Anlagen nicht möglich ist. Vor diesem Hintergrund können die Emissionen für die einzelnen Ausgangsstoffe bewertet werden.

Rinde

Die Ergebnisse der Abgasmessungen aus der Rindenpyrolyse werden als zufriedenstellend angesehen. Von den gemessenen Parametern sind nur die NO_x-Emissionen besonders zu beachten. Allerdings wurden die niedrigsten NO_x-Emissionen mit Rinde auf der Pyreg-Anlage gemessen, und wie oben erwähnt, ist der Grenzwert von 250 mg/Nm³ nur in besonderen Situationen zu berücksichtigen.

Weizenkleie

Im Vergleich zu den Versuchen mit Rinde sind die Emissionen aller gemessenen Parameter bei Weizenkleie tendenziell höher. Dies gilt insbesondere für NO_x, SO₂, PCDD/F und PAK.

Es wurden NO_x-Emissionen von bis zu 1'103 mg/Nm³ gemessen (Weizenkleie PyroFarm). Unter Berücksichtigung einer möglichen Emissionsreduktion durch Prozessanpassungen (z.B. optimierter Brenner, tiefere Brennkammertemperatur) könnten jedoch NO_x-Emissionen von 460 mg/Nm³ hochgerechnet werden (basierend auf den Ergebnissen für Rinde). Trotz einer vorhersehbaren potenziellen Verringerung wird ein Teil der Emissionen aufgrund des höheren Stickstoffgehalts im Ausgangsmaterial (4- bis 7-fach höher als bei Rinde) unvermeidbar sein. NO_x-Emissionen zwischen 2 und 2.5 höher für Weizenkleie im Vergleich zu Rinde sind zu erwarten. Falls erforderlich, sollten primäre oder sekundäre Massnahmen zur NO_x-Reduzierung vorgesehen werden (Kaltschmitt, Hartmann and Hofbauer 2016). Der Stundenmassenstrom von 2'500 g/h wird jedoch bei allen (verhältnismässig kleinen) Anlagen auch ohne Massnahmen deutlich unterschritten.

Auch die SO₂-Emissionen sind etwa 3.4- bis 4.1-fach höher als bei Rinde (70 mg/Nm³ als Basis). Anhand von Messungen und Werten in der Literatur wird davon ausgegangen, dass der Schwefelgehalt etwa 2-fach höher ist als bei Rinde.

Bei den Staub-, PCDD/F- und PAK-Emissionen ist nicht eindeutig geklärt, inwieweit die Prozessbedingungen einen wesentlichen Einfluss auf die Emissionen haben, verglichen mit den Eigenschaften des Substrats. Obwohl diese Emissionen bei Weizenkleie höher sind als bei Rinde, sind sie immer noch sehr niedrig.

Kaffeeabfälle

Die NO_x- und CO-Emissionen von Kaffeeabfällen liegen zwischen jenen, die für Rinde und Weizenkleie gemessen wurden. Falls erforderlich, sollten primäre oder sekundäre Massnahmen zur NO_x-Reduzierung vorgesehen werden (Kaltschmitt, Hartmann and Hofbauer 2016). Die mittleren Staubemissionen sind 2.5- bis 3.9-fach höher als bei den beiden anderen Substraten, bei PyroFarm sogar leicht über dem Grenzwert. Dies wird jedoch nicht als kritisch angesehen, da es mehrere Verfahren zur Reduktion dieser Emissionen auf dem Markt gibt (z.B. Zyklonabscheider, Elektro-, Gewebe- oder Keramikfilter). Während die PCDD/F-Emissionen im gleichen Bereich liegen wie die von Weizenkleie, sind die PAK-Emissionen etwa 6.3-fach höher als bei Weizenkleie. Wie bereits erwähnt, könnte dies mit den erhöhten Partikelemissionen zusammenhängen.



4.3.2 Vergleich der Eigenschaften der Pflanzenkohle

Tabelle 21: Vergleich der Eigenschaften von Pflanzenkohlen, 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

Bei der Bewertung der produzierten Pflanzenkohle, insbesondere im Hinblick auf Schadstoffe, muss unterschieden werden zwischen Schadstoffen, die ursprünglich im Rohmaterial enthalten waren und im Pflanzenkohlenstoff zurückgehalten werden (was bei den meisten Schwermetallen der Fall ist) und Schadstoffen, die während des Pyrolyseprozesses gebildet werden (was in der Regel bei PAK der Fall ist).



Rinde

Unter den verschiedenen untersuchten Parametern ist der Zinkgehalt der einzige Parameter, der bei allen drei Pflanzenkohleproben (d.h. auf PyroTube, Pyreg und PyroFarm produziert) als kritisch anzusehen ist. Dies ist auf den Gehalt an Zink im Ausgangsmaterial zurückzuführen, der im Produkt erhalten bleibt. Hartmann et al. (2000) weisen auf einen Zinkgehalt von Rinde (Nadelholz) zwischen 110 und 170 mg/kg hin. Bei der Pflanzenkohle aus Rinde, die in der Pyreganlage hergestellt wurde, erwies sich dazu der PAK-Gehalt als problematisch. Diese Schadstoffe entstehen in erster Linie während der Pflanzenkohleherstellung und könnten daher durch eine Anpassung der Prozessbedingungen bei der Pyrolyse vermieden werden.

Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die aus Rinde hergestellte Pflanzenkohle den Grenzwert der Klassen EBC-Agro, -Urban, -Gebrauchsmaterial und Rohstoff einhalten könnte.

Weizenkleie

Ähnlich wie bei der Pflanzenkohle aus Rinde ist der Zinkgehalt in der Pflanzenkohle aus Weizenkleie der einzige Parameter, der bei den beiden Pflanzenkohleproben (d.h. PyroTube und PyroFarm) als kritisch betrachtet wird.

In der Literatur sind Zinkkonzentrationen von 24 bis 160 mg/kg für Weizenkleie zu finden (Wang et al. 2020). In einer anderen Studie, die in der Schweiz durchgeführt wurde, lag der Zinkgehalt in Weizenkleie zwischen 31 und 58 mg/kg (BFE 2019). Damit besteht die Möglichkeit, Weizenkleie mit einer geringeren Zinkkonzentration als Ausgangsmaterial zu verwenden.

Kaffeeabfälle

Von den verschiedenen untersuchten Parametern ist der Kupfergehalt der einzige Parameter, der bei den beiden Pflanzenkohleproben (d.h. PyroTube und PyroFarm) als kritisch gilt. In der Literatur wird ein Kupfergehalt zwischen 70 und 185 mg/kg für solche Substrate angegeben (Gottstein et al. 2021). Aufgrund des Massenverlustes während der Pyrolyse und der damit verbundenen Aufkonzentrierung der Schwermetalle in der Pflanzenkohle ist zu vermuten, dass der Kupfergehalt dieses Ausgangsmaterials ein wiederkehrendes Problem sein wird. Sofern keine Kaffeeabfälle mit geringerem Kupfergehalt gefunden werden, kann Pflanzenkohle aus Kaffeeabfällen nicht für Bodenanwendungen genutzt werden.

4.4 Fazit

Im Rahmen von Arbeitspaket 4 wurden drei Ausgangsstoffe in kommerziellen Anlagen pyrolysiert. Die Abgase aus der Pyrolysegasverbrennung und die Zusammensetzung der Pflanzenkohle konnten gemessen werden.

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 SO_2 -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 zugelassen¹³. 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 $< 2\text{-}3 \text{ MW}_{\text{th}}$ zwar unter dem Grenzwert liegen, jedoch sind Massnahmen zur Stickoxidreduktion ab $500 \text{ kW}_{\text{th}}$ 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 zugelassen⁶. 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.

¹³ 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.



5 AP 5: Ökobilanzierung

5.1 Einleitung

Die vorliegende Ökobilanz ist Teil des fünften Arbeitspaketes (AP 5) des Projektes «Erweiterung von Biomasse-Substraten für zusätzliche Energie- und Pflanzenkohleproduktion», welches von der Kaskad-E GmbH und der Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW) in Zusammenarbeit durchgeführt wird. Das Ziel des Projektes ist die Zulassung weiterer Substrate für die Pyrolyse und der entsprechenden Pflanzenkohle- und Energieproduktion. Das EBC (European Biochar Certificate) beinhaltet Richtlinien zur Beurteilung der Eignung von Substraten zur Pflanzenkohleproduktion (EBC 2012-2022) (Version 10.1).

Für jedes Substrat wird die Pyrolysevariante mit einem heutigen Verwertungspfad verglichen. Das Ziel ist, den ökologischen Mehrwert der Pyrolyse gegenüber der heutigen Situation zu zeigen. Wenn kein Mehrwert besteht, werden die in Bezug auf Umweltwirkungen wichtigsten Faktoren identifiziert, welche weitere Untersuchungen vereinfachen werden.

Der Vergleich wird mit zwei Indikatoren durchgeführt, Kohlendioxidemissionen-Äquivalente (CO₂-Äq.) und Umweltbelastungspunkte (UBP). Diese werden respektive mit der Global Warming Potential 100 Methode (GWP100) der IPCC und der Methode der ökologischen Knappheit 2013 für jedes Substrat und jede Variante quantifiziert.

Mit der GWP100-Methode werden die Emissionen in CO₂-Äquivalente umgewandelt und ihren Beitrag zur Klimaerwärmung somit ermittelt. Diese Aggregation ermöglicht den Vergleich des Fussabdruckes jeder Variante miteinander und die Berücksichtigung der in der Pflanzenkohle gespeicherten Kohlenstoffmenge. Wichtige Umweltwirkungen wie der Eintrag von Schwermetallen in den Boden oder in Gewässer werden jedoch mit dieser Methode nicht berücksichtigt.

Die Methode der ökologischen Knappheit trägt zur Abschätzung der Umweltwirkungen auf Ökosysteme, Menschen und Tiere bei. Emissionen, Ressourcenverbräuche, usw. führen jeweils zu einem spezifischen UBP-Wert. Diese Werte werden dann für ein Substrat und eine Variante aufsummiert und führen wiederum zu einem Gesamtscore, welcher eine Basis für den Vergleich liefert. Diese Methode ermöglicht die Beurteilung von Umweltwirkungen, welche nicht oder nur indirekt durch die GWP100-Methode berücksichtigt werden. Bei vollaggregierten Methoden wie diese ist darauf zu achten, dass Informationen während der Umwandlung zu UBP verloren gehen.

Aus der ersten Auswahl von Substraten wurden im Rahmen der vorherigen Arbeitspakete drei Substrate gewählt, welche auf kommerziellen Anlagen untersucht wurden. Die untersuchten Substrate sind:

- Rinde
- Müllereiabfälle (im Folgenden *Weizenkleie* genannt)
- Kaffeeabfälle.



5.2 Methodik

Die Struktur der Ökobilanz entspricht dem ISO-Standard ISO 14040 (siehe auch Abbildung 15).

5.2.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

In der Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen wird festgelegt, wofür die Ökobilanz verwendet werden soll. Es werden Nutzen und Funktionen des zu untersuchenden Objekts festgelegt. Es werden Annahmen und Einschränkungen definiert sowie die vorläufigen Grenzen der Untersuchung festgelegt (Festlegung der Systemgrenze).

5.2.2 Erstellen der Sachbilanz: Datenerhebung, Modellierung

In der Sachbilanz werden die Stoff- und Energieflüsse innerhalb der definierten Systemgrenze erhoben und abgebildet. Die Sachbilanz ist ein rein deskriptives (beschreibendes) Modell ohne Wertung. Allerdings beinhaltet jede Sachbilanz implizite Wertungen, die sich aus den vorher definierten Zielen und aus dem Untersuchungsrahmen ergeben.

In der Sachbilanz werden Daten erhoben, auf welche sich die Umweltanalyse stützt. Bei den Daten wird zwischen Vordergrund- und Hintergrunddaten unterschieden.

Vordergrunddaten entsprechen der Massen- und Energieflüssen der Verwertungsszenarien. Bei der vorliegenden Analyse stammen die Vordergrunddaten von den in den anderen Arbeitspaketen des Projektes durchgeführten Experimenten, aus der Literatur und aus begründeten Annahmen.

Hintergrunddaten werden benötigt, da die Umweltanalyse den ganzen Lebenszyklus von Materialien und Energie beurteilt, also auch vor- und nachgelagerte Prozesse wie die Produktion des Rohmaterials und der Energie oder die Entsorgung von Verbrauchsmaterialien. Die Hintergrunddaten stammen aus der Ökobilanzdatenbank Ecoinvent oder wurden auf Basis von wissenschaftlicher Literatur spezifisch für dieses Projekt erstellt. Prozesse, welche in Ecoinvent nicht vorhanden waren, wurden auf Basis wissenschaftlicher Publikationen neu erstellt.

5.2.3 Wirkungsabschätzung: Bewerten der Umweltauswirkung

Die Wirkungsabschätzung teilt die Ergebnisse der Sachbilanz nach wissenschaftlich basierten qualitativen Gesichtspunkten in verschiedene Wirkungskategorien ein. Das Ergebnis der Wirkungsabschätzung sind die quantitativen Umweltauswirkungen, die das analysierte Objekt verursacht. Dieser Schritt beinhaltet (meist implizit) eine Bewertung, einerseits durch die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethoden und deren Wirkungskategorien an sich und andererseits durch die Auswahl der Emissionen, die in den betroffenen Wirkungskategorien berücksichtigt werden.

5.2.4 Auswertung: Interpretation und Diskussion

In der Auswertung werden für das Ergebnis wichtige Parameter (z. B. einzelne Lebenswegabschnitte oder Wirkungskategorien) identifiziert und mittels Sensitivitätsanalyse beurteilt. Aus den Ergebnissen werden Schlussfolgerungen und Empfehlungen entwickelt.

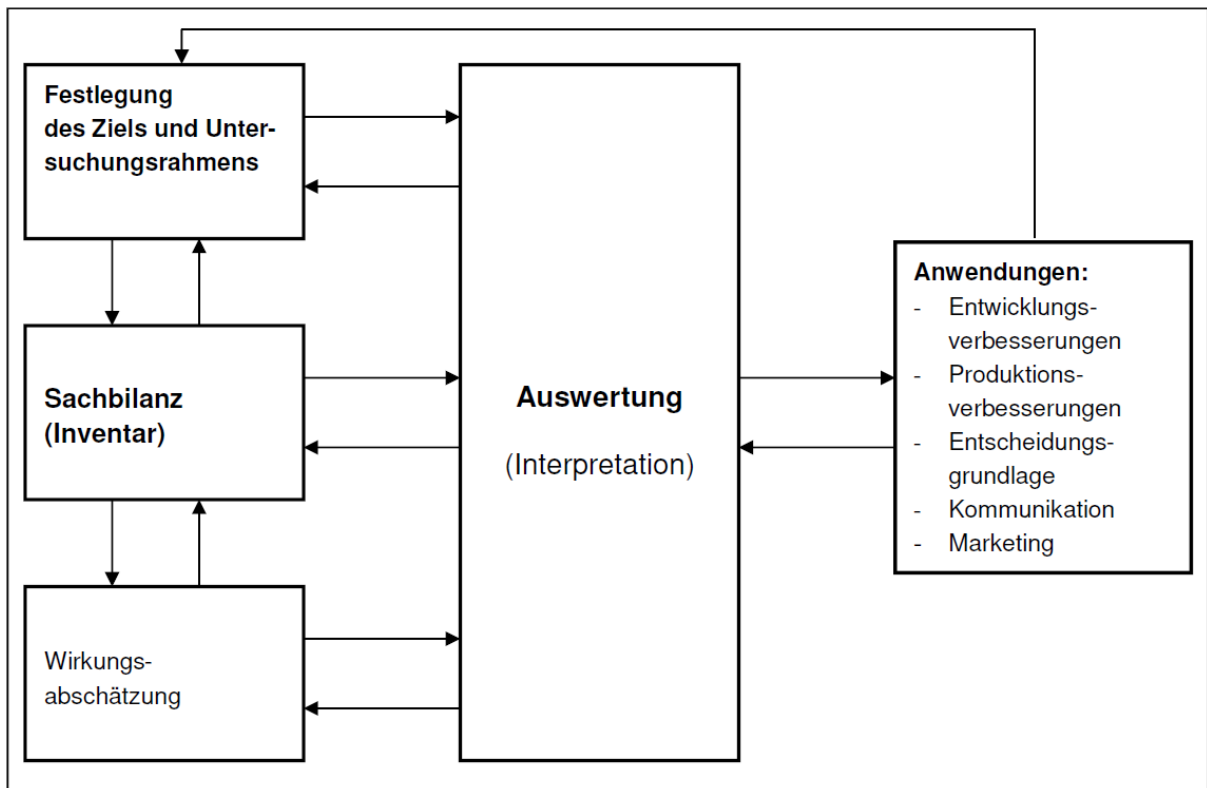


Abbildung 15: Die Phasen der Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/44 aus (Dinkel and Frischknecht 2013)



5.3 Ziel und Untersuchungsrahmen

5.3.1 Ziel

Das Ziel der vorliegenden Ökobilanz ist, quantitative Information zu den Umweltauswirkungen der Pyrolyse der ausgewählten Substrate im Vergleich zu heutigen Verwertungspfaden zu erhalten. Hierfür wird eine ökobilanzielle Bewertung der drei Substrate durchgeführt.

Die in diesem Arbeitspaket erhobenen Informationen sollen die Ergebnisse der anderen Arbeitspakete des Projektes «Erweiterung von Biomasse-Substraten für zusätzliche Energie- und Pflanzenkohleproduktion» komplementieren und der Erweiterung der Liste von zugelassenen Substraten für die Pyrolyse dienen. Für Substrate, bei welchen die Umweltwirkungen der Pyrolyse keinen Mehrwert im Vergleich zur heutigen Verwertung aufweisen, werden die in Bezug auf Umweltwirkungen wichtigsten Faktoren für weitere Analysen identifiziert und beurteilt.

5.3.2 Funktionelle Einheit und Systemgrenzen

Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit dient als Vergleichsbasis beim Vergleich verschiedener Szenarien. Weil verschiedene Verwertungsmethoden miteinander verglichen werden, wird 1 kg gesammeltes Ausgangsmaterial als funktionelle Einheit und somit als Vergleichsbasis gesetzt.

Substrate

Die Substrate wurden in den Arbeitspaketen 1 und 2 des Projektes aufgrund ihrer theoretischen Eignung zur energetischen und stofflichen Verwertung ausgewählt und sind:

- Rinde
- Weizenkleie
- Kaffeeabfälle

Die Substrate werden im Folgenden nur kurz vorgestellt. Weitere Informationen zum Auswahlprozess, welcher zu diesen drei Substraten geführt hat, können dem Zwischenbericht vom Meilenstein 2 entnommen werden.

5.3.3 Systemgrenzen

Das System der vorliegenden Ökobilanzierung umfasst die Verwertung von 1 kg organischem Substrat von seiner Sammlung bis zu seiner Entsorgung oder Verwertung in einem oder mehreren Produkt(en). Weil teilweise ein Substrat mehrere «Leben» haben kann (z. B. Weizenkleie wird zu Mischfutter umgewandelt, dann von Tieren gegessen, ausgeschieden und möglicherweise stofflich und energetisch verwertet), berücksichtigt die vorliegende Ökobilanzierung die Verwertung eines organischen Substrates bis zur ersten (energetischen oder stofflichen) Umwandlung in ein oder mehrere nutzbare(s) Produkt(e). Die analysierten Substrate werden als klimaneutral behandelt und ihre Gewinnung verursacht somit keine Umweltwirkungen in der vorliegenden Ökobilanzierung (Schmidt, Kammann, and Hagemann 2021). Die heutigen Verwertungspfade repräsentieren aktuelle übliche Verwertungen jedes Substrates in der Schweiz, weitere Verwertungs- und Entsorgungsmethoden sind in der Realität möglich.



Szenarien „Heutige Verwertungspfade“

Rinde fällt bei der Schälung von Nadelhölzern im Wald und bei Sägewerken an. Im Szenario der heutigen Verwertung von Rinde wird das Substrat teilweise stofflich und teilweise energetisch verwertet. Der grösste Anteil wird in Wärme-Kraft-Kopplung-Anlagen energetisch zu Strom und Wärme umgewandelt. Diese Fraktion beträgt ca. 50% der gesamten Rinde. Weitere 30% werden heute aufbereitet und als Abdeckmaterial eingesetzt. Die restlichen 20% werden mit Hilfe eines Kompostierungsprozesses stofflich verwertet und in Kompost umgewandelt.

Weizenkleie ist ein Nebenprodukt der Mehlproduktion. Bei der Produktion von 75-80 g Mehl entstehen 25-20 g Weizenkleie. Die Weizenkleie wird im Szenario heutiger Verwertung aufbereitet und der Mischfutterproduktion zugeführt. Die Nachfrage der Futterbranche schwankt mit den Jahreszeiten und erreicht ein Minimum in den Sommermonaten, wenn die Tiere in den Bergen oder auf der Weide sind. Generell sinkt die Nachfrage als Futtermittel zunehmend (s. Argumente in Abschnitt 3.2.1 auf Seite 60).

Kaffeeabfälle fallen während der Röstung von Kaffeebohnen an. Diese werden im heutigen Szenario pelletiert und meist kostenpflichtig entsorgt, z.T. auch über die Kompostierung stofflich oder die Vergärung stofflich und energetisch verwertet. Als Baseline wurde hier mit der Kompostierung gerechnet. Das Pelletieren dient dem Brandschutz und reduziert das Lagervolumen.

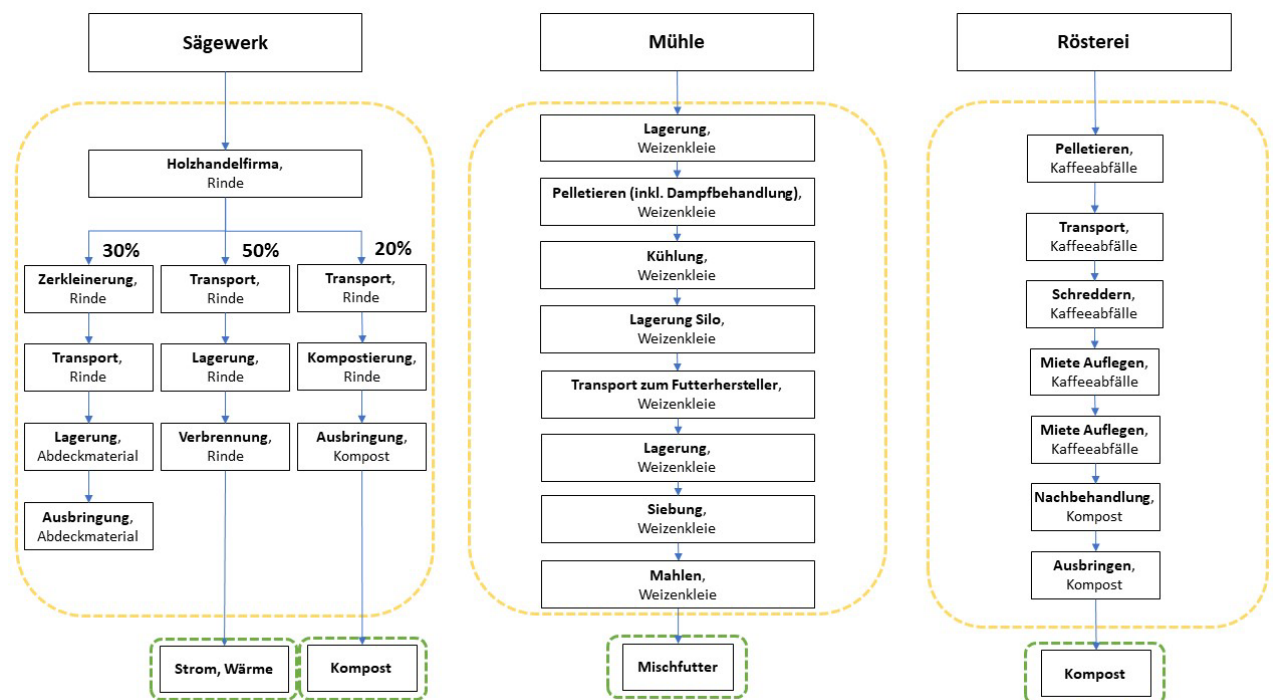


Abbildung 16: Systemgrenze (gelb) der Ökobilanzierung (heutige Verwertungspfade). Mit grün sind die Systemerweiterungen kennzeichnet

Pyrolysepfad

Die Pyrolyse ist ein Umwandlungsprozess, bei welchem organisches Material unter Luftausschluss teiloxydiert wird. Die Hauptparameter des Prozesses sind die Verweilzeit des Materials im Reaktor und



die eingestellte Temperatur. Es ist wichtig zu bemerken, dass Batch- sowie kontinuierliche Verfahren entwickelt wurden. Die Betriebsbedingungen beeinflussen die Produkte der Pyrolyse. Diese sind:

- Energie in Form von Wärme
- Pyrolysegas
- Pyrolyseöl
- Pflanzenkohle
- Asche

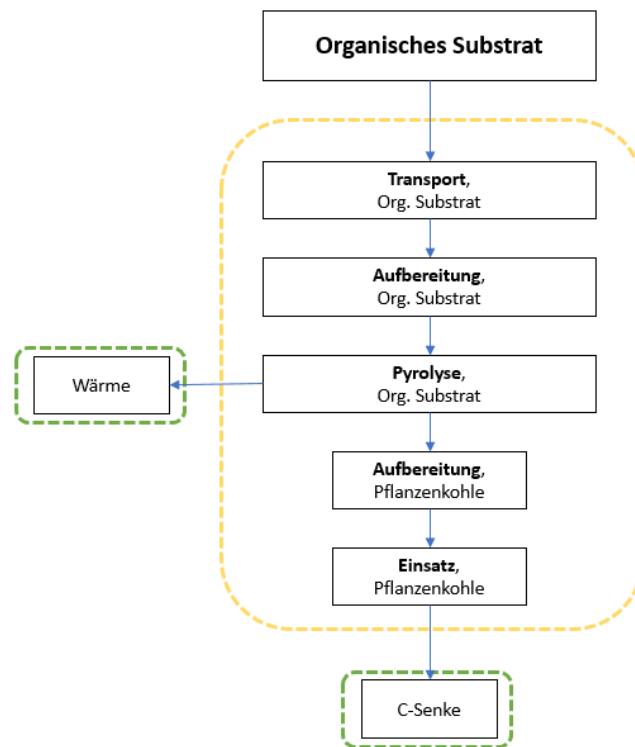


Abbildung 17: Systemgrenze (gelb) der Ökobilanzierung Pyrolyse-Szenarien). Mit grün sind die Systemerweiterungen kennzeichnet.

Im vorliegenden Projekt wurden die gewählten Substrate auf verschiedenen Anlagen pyrolysiert. Tabelle 22 fasst die Eigenschaften der einzelnen Pyrolyse-Anlagen zusammen. Die Berichtteile zu den Arbeitspaketen 3 und 4 des vorliegenden Projektes enthalten weitere Informationen zu den durchgeführten Feld- und Laborversuchen.



Tabelle 22: Eigenschaften der eingesetzten Pyrolyse-Anlagen

	Pyreg-1500	PyroFarm	PyroTube
Ort	Basel	Stettlen	Windisch
Betreiber	IWB	Biohofacker	FHNW
Pyrolyseart	Kontinuierlich	Batch	Kontinuierlich
Betriebsstunden (h/a)	7'500	2'000	Nicht zutreffend
Feuerungswärmeleistung (kW)	1'500	125	ca. 5.75
Wirkungsgrad Wärmeenergie (%)	40	40	30-50

5.3.4 Systemerweiterungen und Szenarien

Mit Hilfe von Systemerweiterungen werden die Nebenprodukte der heutigen Verwertungspfade sowie der Pyrolyse berücksichtigt. Die Berücksichtigung dieser Produkte ist wichtig und kann einen wesentlichen Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanzierung haben. Dazu kann mit Systemerweiterung sichergestellt werden, dass die Vergleichsbasis einheitlich ist und die wichtigsten Elemente (diejenigen mit den grössten Einflüssen auf die Umweltwirkungen) nicht vergessen gehen. In der vorliegenden Ökobilanzierung wird das Gutschriftverfahren eingesetzt. Bei diesem Verfahren werden die Umweltwirkungen der ersetzten Produkte von der Summe der Umweltwirkungen eines Szenarios abgezogen. Beispielsweise werden bei der Verbrennung von Rinde die Umweltwirkungen aus der Produktion von Strom und Wärme abgezogen (siehe auch Tabelle 31 auf Seite 129 im Anhang). Die Nebenprodukte aus der Verwertung von organischem Material, welche für diese Studie von Bedeutung sind, werden folglich kurz besprochen.

Kompost

Kompost kann als Bodenverbesser in der Landwirtschaft eingesetzt werden. Wie verschiedene Studien zeigen, kann somit eine Gutschrift für den Ersatz von Dünger zugewiesen werden (BFE 2012; Old et al. 2018). Der Einsatz von Kompost kann weitere positive Nebenwirkungen auf den Boden und das Pflanzenwachstum haben. Diese Effekte werden von verschiedenen Faktoren beeinflusst (Bodentyp, Klima, Kompostqualität, usw.), deren Analyse nicht im Rahmen der vorliegenden Studie durchgeführt werden konnte. Diese Werte stammen hauptsächlich aus (BFE 2012).

Strom

Strom wird bei der Verbrennung von Rinde in einer Wärme-Kraft-Kopplung-Anlage erzeugt und ersetzt somit Strom aus einer anderen Quelle. Es wird angenommen, dass die durch die Verbrennung von Rinde produzierte Strommenge die gleiche Menge von Schweizer durchschnittlichem Strom ersetzt.

Wärme

Wärme wird bei der Pyrolyse aller berücksichtigten Substrate und bei der Verbrennung von Rinde erzeugt. Ähnlich wie bei der Gutschrift von Strom, ersetzt die Wärmemenge aus der energetischen Verwertung von organischem Material die gleiche Wärmemenge, welche durchschnittlich mit Erdgas in der Schweiz produziert gewesen wäre.

Pflanzenkohle

Pflanzenkohle ist das stoffliche Produkt aus der Verwertung von organischem Material mit Hilfe der Pyrolyse. Diese Kohle verfügt, je nach Produktqualität, über verschiedene Anwendungsmöglichkeiten (EBC 2012-2022). In der vorliegenden Studie wird der Einsatz als Bodenverbesser (Zertifizierung EBC-Agro für Rinde und Weizenkleie) und als Baumaterial (Zertifizierung EBC-Material für Kaffeeabfälle)



modelliert. Die positiven Wirkungen des Einsatzes von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft sind vielfältig, jedoch zum Teil noch nicht genügend untersucht, um quantifiziert werden zu können. Aus diesem Grund wird in der vorliegenden Ökobilanz beim Einsatz von Pflanzenkohle als Bodenverbesserer nur die langfristige CO₂-Speicherung berücksichtigt. Die Berechnung der Kohlenstoffsенке (C-Senke) wird im nächsten Kapitel erläutert.

Beim Einsatz als Baumaterial wird angenommen, dass die eingesetzte Menge an Pflanzenkohle die gleiche Kies- oder Sandmenge ersetzt. In der vorliegenden Ökobilanz wird nur das C-Senkenpotential berücksichtigt, weil das Potential der Pflanzenkohle als Additivversatz, sowie die zusätzlichen positiven Wirkungen des Einsatzes der Pflanzenkohle in Baumaterialien (u. a. erhöhte Festigkeit, reduzierte Durchlässigkeit), weiterhin erforscht werden (Gupta, Kua, and Low 2018; Mensah et al. 2021). Denn die Lebensdauer der Speicherung hängt mit derjenigen des Baumaterials ab, wird für die vorliegende Studie angenommen, dass das mit Pflanzenkohle erstellte Baumaterial als langlebig betrachtet werden kann und somit über ein C-Senkenpotential verfügt (EBC 2012-2022; Der Bundesrat 2020).

Weizenkleie

Weizenkleie wird heute unter anderem in der Mischfutterproduktion eingesetzt. Eine Gutschrift für das ersetzte Primärmaterial wird dafür gewährt. Im Rahmen dieser Studie wurde nach Absprache mit Experten Gerste als Primärmaterial gewählt, andere Getreide (Hafer, Weizen, usw.) wären auch einsetzbar.

5.3.5 Kohlenstoffsенке (C-Senke)

Der Einsatz von Pflanzenkohle als Bodenverbesserer oder als Baumaterial verfügt über das Potential zur langfristigen Speicherung des enthaltenen Kohlenstoffes (C). Das Ausmass der positiven Wirkungen der Pflanzenkohle auf das Bodengleichgewicht hängt von verschiedenen Faktoren wie das ursprüngliche Substrat, die Pyrolyseart und des Bodentyps ab (Old et al. 2018). Ähnlich werden die Wirkungen der Pflanzenkohle auf Baumaterialien weiter erforscht. Laut der EBC-Richtlinie (EBC 2012-2022) (Version 10.1) die CH₄- und N₂O-Emissionen aufgrund ihrer kurzen Lebensdauer mit der GWP20-Methoden beurteilt werden, dies wird aufgrund mangelnder Daten in der vorliegenden Studie nicht gemacht.

Die Berechnung der C-Senke ist eine Bilanz der im Ausgangsmaterial enthaltenen Kohlenstoffmenge und der während der Produktion und Bereitstellung von Pflanzenkohle ausgestossenen Kohlenstoffemissionen. Das C-Senkenpotential der Pflanzenkohle entspricht dann der in der Kohle verbleibenden Kohlenstoff.



Tabelle 23: Szenarien mit entsprechenden Verwertungspfaden und gewährten Gutschriften. In den Szenarien werden die Pyreg-, PyroFarm- und PyroTube-Anlagen mit PR, PF, bzw. PT gekennzeichnet.

Substrat	Rinde (RM)			
Szenario	RM Heute	RM PF	RM PT	RM PR
Verwertung	Abdeckmaterial Kompostierung Verbrennung	Pyrolyse	Pyrolyse	Pyrolyse
Pyrolyse-Anlage	-	PyroFarm	PyroTube	Pyreg-1500
Gutschrift	Dünger, Boden Strom, Wärme	CO ₂ -Senke, Wärme	CO ₂ -Senke, Wärme	CO ₂ -Senke, Wärme
Substrat	Weizenkleie (WK)			
Szenario	WK Heute	WK PF	WK PT	
Verwertung	Mischfutter	Pyrolyse	Pyrolyse	
Pyrolyse-Anlage		PyroFarm	PyroTube	
Gutschrift	Gerste	CO ₂ -Senke, Wärme	CO ₂ -Senke, Wärme	
Substrat	Kaffeabfälle (KH)			
Szenario	KH Heute	KH PF	KH PT	
Verwertung	Kompostierung	Pyrolyse	Pyrolyse	
Pyrolyse-Anlage		PyroFarm	PyroTube	
Gutschrift	Dünger, Boden	CO ₂ -Senke, Wärme	CO ₂ -Senke, Wärme	

5.4 Sachbilanz

5.4.1 Heutige Verwertungspfade

Die Sachbilanzdaten der Szenarien der heutigen Verwertung werden aus der Literatur, aus Interviews von Experten und aus Feld- und Laborversuchen (siehe Ergebnisse der Arbeitspakete 3 und 4 für weitere Informationen zu den durchgeführten Versuchen) erhoben. Die Tabellen im Anhang 11.5 geben Auskunft über die Herkunft der einzelnen Datenpunkte.

5.4.2 Pyrolysepfad

Die Substrate wurden auf verschiedenen Pyrolyse-Anlagen pyrolysiert. Dies wird entsprechend in der Ökobilanz berücksichtigt. Die Sachbilanzen der einzelnen Pyrolyse-Reaktoren werden aus der Literatur, aus Interviews mit Experten und mit Hilfe von Annahmen vervollständigt. Werte zu den Emissionen während der Pyrolyse stammen aus den Feld- und Laborversuchen, sowie aus der Literatur.

5.4.3 Transporte

Transportdistanzen und -mittel werden geschätzt. Die Standarddistanz wurde auf 50 km festgelegt.



5.5 Wirkungsabschätzung

Für die Wirkungsabschätzung wird ein Indikator für den Klimawandel (CO₂-Bilanz resp. CO₂-Fussabdruck) anhand der GWP100-Methode sowie einer für die Gesamtumweltauswirkung (Umweltbelastungspunkte) anhand der Methode der ökologischen Knappheit verwendet.

5.5.1 Vergleich heutiger Verwertungspfade mit der Pyrolysevariante

Rinde

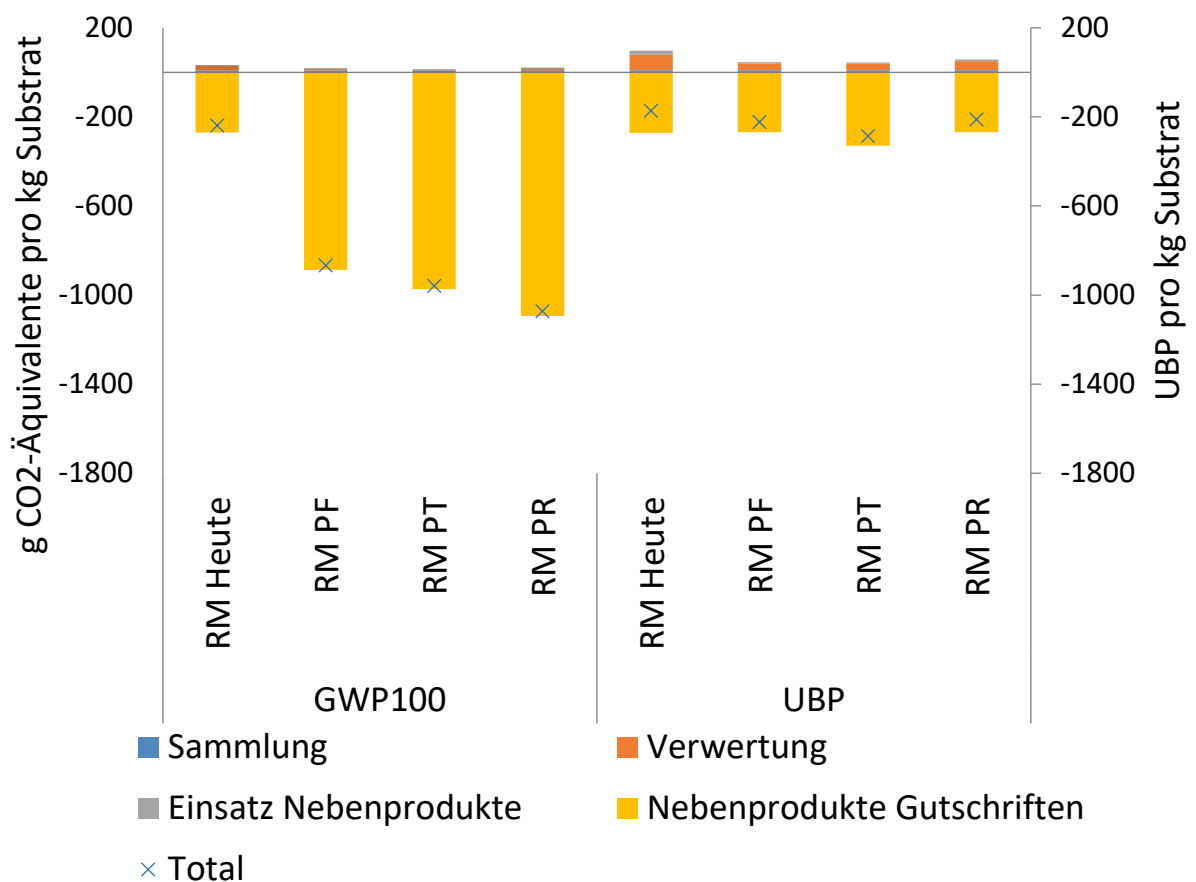


Abbildung 18: Umweltwirkungen der Verwertungsszenarien pro kg Rinde in g CO₂-Äquivalente (links) und UBP (rechts). In den Szenarien werden die PyroFarm-, PyroTube- und Pyreg-Anlagen mit PF, PT, bzw. PR gekennzeichnet.



Weizenkleie

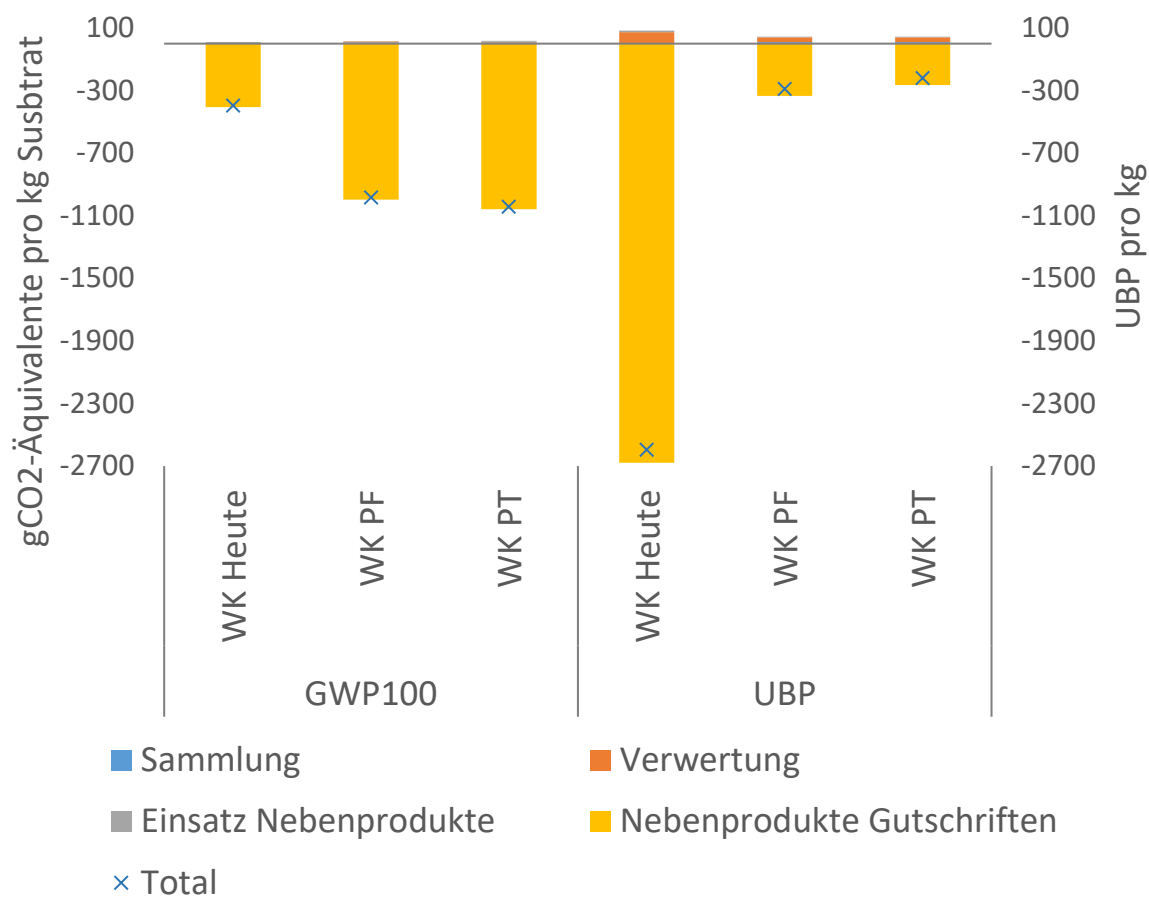


Abbildung 19: Umweltwirkungen der Verwertungsszenarien pro kg Weizenkleie in g CO₂-Äquivalente (links) und UBP (rechts). In den Szenarien werden die PyroFarm- und PyroTube-Anlagen mit PF bzw. PT gekennzeichnet.



Kaffeeabfälle

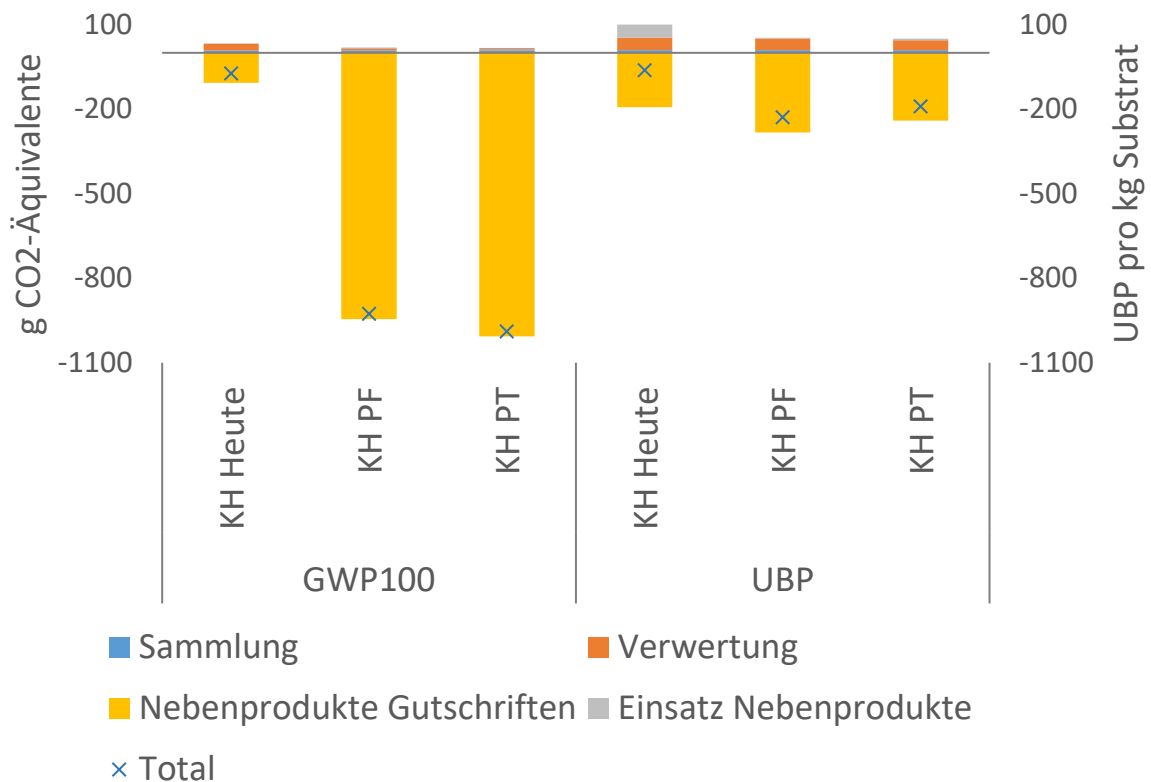


Abbildung 20: Umweltwirkungen der Verwertungsszenarien pro kg Kaffeeabfälle in g CO₂-Äquivalente (links) und UBP (rechts). In den Szenarien werden die PyroFarm- und PyroTube-Anlagen mit PF, bzw. PT gekennzeichnet.

5.6 Beurteilung der Ergebnisse und Diskussion

5.6.1 Vergleich der heutigen Verwertung mit den Pyrolysevarianten

Allgemein

Die Umweltwirkungen der heutigen Substratverwertung wurden mit denjenigen aus der Pyrolyse anhand einer Ökobilanzierung verglichen. Die folgende Diskussion legt den Fokus auf den Vergleich der Verwertungspfade für jedes Substrat und nicht auf den Vergleich der Substrate miteinander.

Dank dem Gutschriftverfahren werden in allen Szenarien die Umweltaufwände (Emissionen, Energieverbräuche, usw.) durch die gewährten Gutschriften kompensiert und negative Umweltwirkungen werden dementsprechend erreicht.

Bei jedem Substrat schneidet die Pyrolyse (auf allen Anlagen) mit der GWP100-Methode (CO₂-Äquivalente) besser als der heutige Verwertungspfad ab. Mit der Methode der ökologischen Knappheit (UBP) ist nur der heutige Verwertungspfad der Weizenkleie aufgrund der für die ersetzte Rohstoffmenge gewährten Gutschrift ökologischer als die Pyrolysevariante. Bei Kaffeeabfällen und Rinde führen die Pyrolyse-Szenarien zu einer Reduktion der Umweltbelastungspunkte im Vergleich zur heutigen Situation.



Kaffeeabfälle (KH)

Die Kaffeeabfälle werden im heutigen Szenario durch Kompostierung stofflich verwertet. Die Daten aus den Labor- und Feldversuchen und die darauf aufgebauten Szenarien zeigen, dass die Pyrolyse, sowohl auf der PyroFarm (KH PF) wie auf der PyroTube (KH PT), mit beiden berücksichtigten Wirkungsabschätzungsmethoden besser als die heutige stoffliche Verwertung abschneidet.

CO₂-Äquivalente

Pro Kilogramm verwerteter Kaffeeabfälle werden heute -0.07 kg CO₂-Äq. emittiert. Beim heutigen Verwertungspfad fallen die direkten Emissionen während des Kompostierprozesses und der Transport der frischen Kaffeeabfälle mit 72 respektive 25% der emittierten CO₂-Äquivalenten am schwersten ins Gewicht. Die durch den Einsatz vom Kompost gewährten Gutschriften für den Ersatz von mineralischem Dünger und die positive Wirkung auf den Boden kompensieren diese Aufwände und ermöglichen eine klimapositive Verwertung der Kaffeeabfälle. Bei beiden Pyrolyse-Szenarien (KH PF und KH PT) werden weniger CO₂-Äquivalente emittiert (-0.93 bzw. -0.99 kg). Dabei verursachen der Transport der frischen Biomasse (45 bzw. 47%), die eingesetzte Erdgasmenge für die Vorbereitung der Anlage (15%), die direkten CH₄-Emissionen des Pyrolyseprozesses (20 bzw. 13%) und die Produktion des Verpackungsmaterials für den Vertrieb der Pflanzenkohle (13 bzw. 20%) die höchsten Umweltwirkungen, basierend auf CO₂-Äquivalenten.

UBP

Durch die heutige Kompostierung von Kaffeeabfälle werden -62 UBP pro kg berechnet. Die Umweltbelastungspunkte der heutigen Verwertung werden hauptsächlich von dem Schwermetalleintrag in den Boden durch Komposteinsatz (58%), dem Kompostierprozess (34%) selbst und dem Transport der frischen Biomasse (7%) verursacht. Beide Pyrolyseszenarien (KH PF und KH PT) schneiden bezüglich Umweltbelastungspunkte mit -229 respektive -190 UBP pro kg, besser als das Szenario KH Heute ab. Die berechneten UBPs sind im Wesentlichen dem Stromverbrauch für den Anlagenbetrieb (52 bzw. 56%) und dem Transport des Substrats zur Anlage (17, bzw. 19%) zuzuordnen. Die direkten Emissionen von polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffen sind mit 17 bzw. 11% der Umweltbelastungspunkte ebenfalls relevant. Die Gutschrift, welche für die Wärmeproduktion aus der Pyrolyse gewährt wird, kompensiert die UBP ganzheitlich und führt zu einer negativen UBP-Summe. Die Pyrolyse auf der PyroFarm-Anlage hat zu einer grösseren Energieausbeute als auf der PyroTube und folglich zu weniger Umweltbelastungspunkten geführt. Dabei soll darauf geachtet werden, dass der Stromverbrauch der PyroFarm-Anlage aufgrund der Modellierung (basierend auf den Stromverbrauch der Pyreg-Anlage) überschätzt wurde und in der Realität pro Wärmeleistung kleiner ist.

Rinde

Rinde wird im heutigen Szenario teilweise als Abdeckmaterial verwendet, teilweise kompostiert und teilweise in einer Wärme-Kraft-Kopplung-Anlage energetisch verwertet. Die Rinde wurde auf den drei Pyrolyse-Anlagen (Pyreg-1500, PyroFarm und PyroTube) untersucht.

CO₂-Äquivalente

Die heutige Verwertung der Rinde führt zu -0.24 kg CO₂-Äquivalenten pro kg. Der Transport der Biomasse trägt mit mehr als 30% der Emissionen am meisten zum Treibhausgaseffekt der heutigen Verwertung bei. Diese anfallenden CO₂-Äquivalente werden jedoch von den Gutschriften, hauptsächlich aus der Wärmeproduktion in der Wärme-Kraft-Kopplung-Anlage, kompensiert. Die Pyrolyse-Szenarien führen zu -0.87 (RM PF), -0.96 (RM PT) und -1.1 (RM PR) kg CO₂-Äquivalenten pro kg Rinde. Ähnlich wie für die Pyrolyse der Kaffeeabfälle sind der Transport der Biomasse (mehr als 30%), der



Erdgasverbrauch für die Vorbereitung der Anlage (12-18%) und die Verpackung der Pflanzenkohle (11-15%) wichtige Quellen von CO₂-Äquivalenten. Die direkten CH₄-Emissionen spielen bei der Pyrolyse von Rinde eine kleinere Rolle als bei derjenigen der Kaffeeabfälle.

UBP

Mit Hilfe der Methode der ökologischen Knappheit konnte der Wert von -173 UBP pro kg Rinde der heutigen Verwertung zugewiesen werden. Diese UBP werden hauptsächlich (mehr als 50%) durch die PM-, NO_x- und Dioxin-Emissionen aus der Verbrennung des Holzes in der Wärme-Kraft-Kopplungs-Anlage verursacht. Bei den Pyrolyse-Szenarien werden -224 (RM PF), -286 (RM PT) -211 (RM PR) ermittelt. Mit mehr als 45% fällt bei allen Pyrolyse-Szenarien der Stromverbrauch für den Anlagenbetrieb schwer ins Gewicht. Diese Umweltwirkungen werden durch die Wärmegutschrift kompensiert. Das Szenario, in welchem die Pyrolyse auf der PyroTube-Anlage durchgeführt wird, führt aufgrund der erhöhten Wärmeausbeute zu tieferen UBPs.

Weizenkleie (WK)

Die Weizenkleie wird heute als Substrat für die Mischfutterproduktion verwendet. Die Pyrolyse-Szenarien deuten darauf hin, dass sich die Ökobilanz der Verwertung von Weizenkleie mit einer Umstellung zur Pyrolyse bezüglich des Treibhausgaseffektes verbessern würde. Aufgrund der hohen Gutschrift, welche heute für den Ersatz von Gerste im Mischfutter gewährt wird, schneidet die Pyrolysevariante von Weizenkleie in Bezug auf Umweltbelastungspunkte schlechter als die heutige Verwertung ab. Doch zunehmend ist Weizenkleie nicht mehr als Futtermittel gefragt, weshalb die Pyrolyse in Zukunft zu einer noch interessanteren Verwertungsalternative werden kann (s. Argumente in Abschnitt 3.2.1 auf Seite 60).

CO₂-Äquivalente

Das Szenario der heutigen Verwertung von Weizenkleie führt zur Emission von -0.40 kg CO₂-Äquivalenten pro kg Weizenkleie, bei welchem die Aufwände (Transport und Aufbereitung) durch die Gutschrift für das ersetzte Primärmaterial (in der vorliegenden Modellierung Gerste) kompensiert werden. Die Pyrolyse-Szenarien WK PF und WK PT führen zu -0.98 und -1.04 kg CO₂-Äquivalenten pro kg Weizenkleie. Die gleichen Prozesse wie in den Pyrolyse-Szenarien des Rindenmaterials sind hier relevant.

UBP

Die ermittelten Umweltbelastungspunkte von -2'594 UBP pro kg Weizenkleie der heutigen Verwertung übertreffen diejenigen der Pyrolyse-Szenarien stark: -289 UBP für WK PF und -219 UBP für WK PT. Der tiefe Wert der heutigen Verwertung stammt aus der Gutschrift, welche für den Ersatz der Gerste durch die Weizenkleie gewährt wurde. Dieser Ersatz ermöglicht die Vermeidung der Emissionen ins Grundwasser (Nitrat) und in den Boden (Schwermetalle). Bei den Pyrolyse-Szenarien spielen erneut der Stromverbrauch der Anlage und der Transport der Biomasse eine wichtige Rolle in Bezug auf Umweltbelastungspunkte.



5.6.2 Gutschriften

Das Gutschriftverfahren wurde für die durchgeführte Ökobilanz gewählt, um Produkte der Verwertung berücksichtigen zu können. Die Ergebnisse zeigen die hohe Relevanz der gewährten Gutschriften für jede Verwertungsmethode und jedes Substrat. Somit müssen die Ergebnisse immer mit dem Kontext betrachtet werden. Für den bei der Verbrennung von Rinde erzeugten Strom wurde zum Beispiel angenommen, dass damit die gleiche Strommenge zum Schweizer Strommix ersetzt werden kann. Dies ist in der Realität nur für eine nationale Betrachtung gültig, bei einer Änderung der geografischen Systemgrenzen würde diese Annahme nicht mehr zutreffen. In einer Region oder Firma, bei welcher zertifizierter Strom eingesetzt wird, würde dem durch Verbrennung produzierten Strom eine kleinere Gutschrift zugeordnet werden. Mit dieser Modellierung wird die Nachfrage (z. B. von Wärme oder Strom) nicht berücksichtigt und die Annahme gemacht, dass die produzierte Energie immer abgenommen werden kann, was nicht der Realität entspricht. Dazu werden sich die Umweltwirkungen des Schweizer Strommix mit der Zeit möglicherweise verbessern, was zu kleineren Gutschriften in der Zukunft führen könnte. Diese Bemerkungen gelten auch für die anderen modellierten Gutschriften.

5.6.3 Pflanzenkohle

Die Modellierung zeigt die Bedeutung der Kohlenstoffspeicherung der Pflanzenkohle für die Verwertung organischer Biomasse. Die Lebensdauer der Speicherung hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie die gewählte Einsatzart (EBC-Kategorien) der Pflanzenkohle, die enthaltene Menge an fixen Kohlenstoff in der Kohle, die Einbringungstiefe und der Bodentyp (wenn die Pflanzenkohle als Bodenverbesserer eingesetzt wird), usw. Aus den Labor- und Feldversuchen geht hervor, dass die Kaffeeabfälle aufgrund des erhöhten Kupfergehaltes höchstens für die Kategorie „EBC-Material“ tauglich sind. Der Einsatz von Pflanzenkohle in Baumaterialien ist vielversprechend und die positiven Nebenwirkungen wie die verbesserte Isolation, die leichtere Bauweise, die erhöhte Festigkeit und niedrigere Durchlässigkeit werden weiterhin erforscht. Diese sollten in zukünftigen Ökobilanzen ebenfalls als Gutschrift miteinbezogen werden. Auf ähnlicher Weise sollten die positiven Wirkungen eines Pflanzenkohleneinsatzes auf den Boden in die Ökobilanz einfließen (Beuttler et al. 2019). Dies hätte jedoch den Rahmen der vorliegenden Studie gesprengt.

5.6.4 Sachbilanz

Während der Erhebung der Daten für die Ökobilanzierung wurde darauf geachtet, eine gewisse Einheitlichkeit bezüglich der Genauigkeit und Unsicherheit der Daten anzustreben. Im Gegensatz zu den Szenarien der heutigen Verwertungspfade basieren die Pyrolyse-Szenarien auf Feld- und Laborversuchen. Diese verfügen über eine gewisse Messunsicherheit, welche substrat- und anlagenspezifisch ist. Eine Unsicherheit besteht auch bei den Daten der heutigen Verwertungsszenarien, diese betrifft die Eignung und Aktualität der gewählten Datensätze mit den modellierten Prozessen. Bei der Kompostierung konnte beispielsweise keine Daten zur Umwandlung von pelletierten Kaffeeabfälle zu Kompost erhoben werden, sondern „standard“ Daten zur Kompostierung von Biomasse in der Schweiz (BFE 2012).



5.7 Fazit

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.



6 AP 6: Techno-ökonomische Bewertung

Gemäss Auftrag sollen bei der techno-ökonomischen Bewertung die Wärmegestehungskosten der 400-kW_{th}-Anlage von Biomacon in Flaach (ZH) für jedes der getesteten Substrate untersucht werden. Am Ende von AP 5 stellte sich jedoch die Frage, ob diese Bewertung für die beiden nicht holzigen Substrate überhaupt sinnvoll ist. Die Projektgruppe beschloss, diese exemplarisch nur an einem zulassungsfähigen Substrat, dem Rindenmulch, durchzuführen, jedoch mittels einer umfassenden Sensitivitätsanalyse bzgl. Substratpreis, Aufbereitungskosten, anlagenseitigen Investitionen, Anlagenauslastung, Pflanzenkohle- und Wärmeverkaufspreis sowie CO₂-Vergütung. So lassen sich möglichst viele Kombinationen von Substraten und Kohleabsatzmärkten abbilden. Zudem soll die Bewertung nicht nur für die Pyrolyseanlage von Biomacon in Flaach (400 kW thermisch, Biomacon 400) sondern ebenso für die Pyrolyseanlagen von Pyreg in Basel (650 kW thermisch, Pyreg 650) durchgeführt werden. Diese werden im Folgenden als «untersuchte Technologien» bezeichnet. Es werden dabei im Weiteren nicht die Wärmegestehungskosten als Mass der techno-ökonomischen Bewertung sondern der Jahresgewinn vor Steuern (EBT, Earnings Before Taxes) ermittelt und verglichen.

6.1 Wirtschaftlichkeitsparameter

Bei der folgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden die Investitionskosten sowie die Kosten für Betrieb und Unterhalt der beiden untersuchten Technologien ermittelt. Die Genauigkeit beträgt dabei +25/-0%. Die Ermittlung der Investitionen erfolgt mit Einheits- und Elementpreisen an Hand von Vorausmassen, abgeleitet aus Erfahrungswerten. Dabei werden die Peripherieanlagen (Brennstoffeinbringung, Kohleaustrag und Kamin) eingerechnet. Die Kosten für die Wärmeverteilung (Speicher, Expansionsgefäss, Wärmeverteilkasten, Nahwärmenetz, Rückkühlung) hingegen werden nicht berücksichtigt. Die Investitionen für den Heizraum können stark variieren, da sie von der lokalen Situation und möglichen Eigenleistungen geprägt sind. Sie können auf den Entscheid für oder gegen eine Pyrolyse-Anlage grossen Einfluss haben. Hier wird mit Investitionen von 50'000 CHF Fixkosten plus 250 CHF pro Raumvolumen gerechnet.

6.1.1 Investitionen / Annuität

Sämtliche Investitionen werden mittels Annuitätenmethode in Jahreskosten umgerechnet. Folgende Parameter gelten dabei:

- Kapitalverzinsung von 3.5%
- Abschreibungszeiten (Nutzungsdauer): Anlagen 15 Jahre (Berechnung Sensitivität: +/- 50%), Tiefbau / Gebäude 40 Jahre
- Anlagenauslastung (Vollbetriebsstunden): 5'000 Stunden pro Jahr (Berechnung Sensitivität: +/- 50%)

6.1.2 Energiepreise

Folgende Energiepreise werden berücksichtigt:

- Brennstoffkosten Rindenmulch: 200 CHF pro Tonne (Berechnung Sensitivität: +/- 50%)
 - Material inkl. Anlieferung: 180 CHF pro Tonne
 - Trocknung (optional): 20 CHF pro Tonne
 - Pelletierung (optional, inkl. Trocknung) 45 CHF pro Tonne
- Stromkosten Antriebe Pyrolyse: 15 Rp./kWh



- Brennstoffkosten Startgas (nur bei Pyreg): 12 Rp./kWh

6.1.3 Erlöse

- Verkaufspreis Pyrolyse-Wärme (max. 85°C) ab Anlage: 12 Rp./kWh (Berechnung Sensitivität: +/- 50%)
- Verkaufspreis Pflanzkohle, 700 CHF pro Tonne (Berechnung Sensitivität: +/- 50%)
Die tiefsten Pflanzkohlepreise sind bei Materialanwendungen (z.B. Zementindustrie) zu erwarten, die höchsten Preise bei Futterkohle.

6.1.4 Förderungen

- CO₂-Vergütung freiwilliger Markt (bestehendes Programm von First Climate seit 2020): 100 CHF pro Tonne CO₂ (entspricht 280 CHF pro Tonne Pflanzkohle, Berechnung Sensitivität: +/- 50%)
- CO₂-Vergütung verpflichtender CO₂-Markt (Förderung KliK): zu rechnen ist mit bis zu 150 CHF pro Tonne CO₂. Berücksichtigt wurde vorerst nichts resp. dies entspricht dem Höchstpreis-Szenario beim freiwilligen Markt (s. oben)
- Investitionsförderung Klimastiftung: keine Vergütung seit 1.1.2022

6.1.5 Betrieb, Unterhalt und Qualitätskontrolle

Der **Betriebsaufwand** setzt sich zusammen aus

- Substratbereitstellung und Überwachung des Eintrags
- Überwachung des Kohleaustrags und Kohlelagerbewirtschaftung resp. Kohleabtransports
- wärmebedarfsbedingten Neuzündungen der Anlage
- Stromkosten Antriebe und Steuerung
- BigBag-Kosten Pflanzkohleverpackung (10 CHF pro Stück, 400 kg Kohle pro BigBag)
- EBC-Zertifizierung

Die **Unterhaltsarbeiten** beinhalten:

- Nur Biomacon: Automatische Reinigung der Rauchzüge (dazu muss die Anlage für maximal 15 Minuten auf Standby gehen), ca. alle 500 Betriebsstunden
- Leerung des Flugaschenbehälters (Biomacon) / Zyklons (Pyreg), ca. alle 2-3 Monate
- Schmierung der Lager und Antriebe, ca. alle 3 Monate. Ablagerungen in der Brennkammer müssen nicht gereinigt werden und werden beim Ersatz der Schamott-Auskleidung vor Ort nach ca. 10 Jahren entfernt.

Bei Verkauf der Pflanzkohle an Dritte ist eine jährliche **Qualitätskontrolle nach EBC** nötig. Dazu müssen etwa 3-10 Liter Pflanzkohle zur Laboranalyse (z.B.: Labor Eurofins Ost, Freiberg) eingeschickt werden. Die Analysen werden daraufhin innert zwei Wochen zu Kosten von 740 Euro durchgeführt. Bei häufigem Substratwechsel sind entsprechend mehr Laboranalysen nötig. Zudem sind täglich Rückstellproben zu entnehmen.



6.2 Ergebnisse Wirtschaftlichkeit

Aus den Input-Parametern wird die Wirtschaftlichkeit für die beiden untersuchten Technologien bestimmt. Dabei werden mittels Annuitätenmethode die Jahreskosten berechnet und von den Erlösen abgezogen. Daraus ergibt sich der Jahresgewinn vor Steuern (EBT, Earnings Before Taxes).

6.2.1 Jahresgewinn vor Steuern

Die Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung in der Tabelle auf der folgenden Seite basieren auf den folgenden 100%-Werten für die sechs wichtigsten Input-Parameter:

- Investitionen: Biomacon 755'000 / Pyreg 2'480'100 CHF
- Nutzungsdauer Anlage: 15 Jahre
- Anlagenauslastung (Vollbetriebsstunden): 5'000 Stunden/a
- Brennstoffkosten Rindenmulch: 200 CHF/Tonne Holz
- Verkaufspreis Pyrolyse-Wärme (max. 85°C) ab Anlage: 12 Rp./kWh
- Verkaufspreis Pflanzkohle: 700 CHF/Tonne PK
- CO₂-Vergütung am freiwilligen Markt: 100 CHF/Tonne CO₂

Diese Werte stehen jeweils für 100% und werden in der Sensitivitätsanalyse im folgenden Abschnitt jeweils um +/-50% variiert.

Die Biomacon 400 erreicht mit 89'000 CHF Jahresgewinn eine bessere Wirtschaftlichkeit als die Pyreg 650 mit 26'000 CHF Jahresgewinn.



Wirtschaftlichkeit BFE-Pyrochar-Projekt			
BIOMACON-Simplex-Converter 400 kWth und Pyreg 650 kWth	Biomacon	Pyreg	
Vergleich Wärmegestehungskosten, Kaskad-E GmbH			
08.08.2022			
P R O Z E S S			
Brennstoffauswahl			
Brennstoff-Bedarf brutto, Rindenmulch	207.8	337.7	kg pro Stunde
Aschegehalt (pro TS)	3.8	3.8	%
Feuchtegehalt	15.0	15.0	%
Brennstoff-Bedarf netto (Holz TS, exkl. Asche)	169.9	276.2	kg TS pro Stunde
Aschedurchsatz	6.7	10.9	kg Asche pro Stunde
Kohle-Output, TS inkl. Totalasche (Kohleproduktion)	47.5	77.2	kg TS inkl. Asche pro Stunde
Heizwert Kohle (trocken W = 0%)	9.1	9.1	kWh/kg TS
Brennwert Ho (Brennwert)	4.77	4.77	kWh/kg
Heizwert Hu	4.36	4.36	kWh/kg Feuchtmasse
Brennstoff-Leistung	906.0	1'472.3	kW
Vollbetriebsstunden	5'000	5'000	h pro Jahr
Energieleistung Kohle	371.5	603.6	kW
Eigenstrombedarf (Dauerleistung)	20.0	48.0	kW
Wirkungsgrad thermisch total, bezogen auf Brennstoffinput	44.2%	44.2%	
thermische Nennleistung (Nutzleistung)	400	650	kW
Netto-Wärmeproduktion total	2'000'000	3'250'000	kWh pro Jahr
davon Netzverluste	160'000	160'000	kWh pro Jahr
Nutzärmeproduktion Pyrolyse (Verkauf)	1'840'000	3'090'000	kWh pro Jahr
Brennstoffverbrauch brutto	1'039'150	1'688'619	kg pro Jahr
Pflanzkohleproduktion	237'664	386'204	kg pro Jahr
Kohleproduktion netto (exkl. Asche)	204'099	331'662	kg pro Jahr
C-Anteil langfristig im Boden gespeichert	76.4%	76.4%	
Kohleproduktion Sequestrierung	155'858	253'269	kg pro Jahr
CO2-Sequestrierung	571'478	928'652	kg pro Jahr
I N V E S T I T I O N E N			
* Kernanlage (Offerte Unternehmen), Eurokurs: 1.00	371'000	1'891'000	CHF
Positionen, die bauseits vom Kunden bereitzustellen sind:			
* Stromversorgung 3x400V, 32A 50Hz	5'000	5'000	CHF
* Notkühlung (Tischkühler Nennleistung)	25'000	37'000	CHF
* Pufferspeicher, 30l/kW, plus Expansionsgefäß")	40'000	59'000	CHF
* Frischwasserbereitstellung 3bar (auch bei Stromausfall, DN32), Abwasserverrohrung	3'000	3'000	CHF
* Internetanschluss für Fernwartung	1'000	1'000	CHF
* Silo Inputsubstrat, 0.5m3 pro kW (10 Tage Autonomie bei Vollbetrieb)	91'000	134'000	CHF
* Pflanzkohleaustrag und Lagerung	18'000	24'000	CHF
* Kaminanlage	15'000	20'000	CHF
* Heizungsarbeiten und hydraulische Anbindung	30'000	30'000	CHF
* Automatisierung (Schubbodentrockner, Eintrag, Austrag, Fernwärmenetz)	20'000	20'000	CHF
* Heizungsraum: 50 kWh plus 250 CHF pro Kubikmeter Raumvolumen	100'000	138'000	CHF
(Raumvolumen-Bedarf)	200	350	m3
* Reserve	36'000	118'100	CHF
Totale Investition Anlage	655'000	2'342'100	CHF
Totale Investition Gebäude	100'000	138'000	CHF
E C O - G R U N D L A G E N			
Kapitalverzinsung	3.5%	3.5%	
Unterhalt	2.3%	2.3%	
Amortisation Anlagen	15	15	a
Amortisation Tiefbau / Gebäude	40	40	a
Amortisation Nahwärmenetz	60	60	a
Brennstoffkosten spezifisch: 20CHF/100kg + 4.5CHF/100kg Pelletierung	0.200	0.200	CHF pro kg Feuchtgewicht
Stromkosten Pyrolyse	15	15	Rp./kWh
Stromverbrauch Pyrolyse	100'000	240'000	kWh/a
Brennstoffkosten Spitzenkessel, Flaschengas: 0.8 CHF/kg	0.8	0.8	CHF/kg
Verkauf Pyrolyse-Wärme	12	12	Rp./kWh
Verkaufspreis Pflanzkohle	700	700	CHF pro Tonne PK
Pflanzkohleproduktion	238	386	Tonne/a
CO2-Vergütung (freiwilliger Markt: 70 CHF/t, CO2-Gesetz Obergrenze: 320 CHF/t)	100	100	CHF/Tonne CO2
CO2-Sequestrierung: 76.4% C langfristig im Boden gespeichert	571	929	Tonnen CO2/a
J A H R E S K O S T E N			
Jahreskosten Investition Anlagen (Annuität)	56'870	203'353	CHF pro Jahr
Jahreskosten Investition Gebäude (Annuität)	4'683	6'462	CHF pro Jahr
Unterhaltskosten	14'785	52'866	CHF pro Jahr
Betriebskosten	50'000	60'000	CHF pro Jahr pro Anlage
Big-Bag-Kosten	5'942	9'655	CHF pro Jahr
Brennstoffkosten Pyrolyseanlage	207'830	337'724	CHF pro Jahr
Stromkosten Pyrolyseanlage	15'000	36'000	CHF pro Jahr
Brennstoffkosten Flaschengas	0	1'920	CHF pro Jahr
Jahreskosten brutto	355'109	707'980	CHF pro Jahr
- Vergütungen:			
- Verkauf Nutzwärme Pyrolyse an Wärmeverbund	220'800	370'800	CHF pro Jahr
- Verkauf Pflanzkohle	166'365	270'343	CHF pro Jahr
- CO2-Vergütung (freiwilliger Markt, KliK)	57'148	92'865	CHF pro Jahr
Jahresgewinn vor Steuern (EBT)	89'203	26'028	CHF pro Jahr



6.2.2 Sensitivität

Die folgenden sechs wichtigsten Input-Parameter werden jeweils von 50% bis 150% variiert. Dabei werden alle übrigen Parameter-Werte bei 100% festgesetzt:

- Investitionen: Biomacon 0.38 bis 1.14 mio. / Pyreg 1.24 bis 3.72 mio. CHF
- Nutzungsdauer Anlage: 7.5 bis 21.5 Jahre
- Anlagenauslastung (Vollbetriebsstunden): 2'500 bis 7'500 Stunden/a
- Brennstoffkosten Rindenmulch: 100 bis 300 CHF/Tonne Holz
- Verkaufspreis Pyrolyse-Wärme (max. 85°C) ab Anlage: 6 bis 18 Rp./kWh
- Verkaufspreis Pflanzkohle: 350 bis 1'050 CHF/Tonne PK
- CO₂-Vergütung am freiwilligen Markt: 50 bis 150 CHF/Tonne CO₂

Die Ergebnisse sind in der Abbildung 21 und der Abbildung 22 auf den folgenden Seiten dargestellt.

6.2.3 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 Pflanzkohle 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.

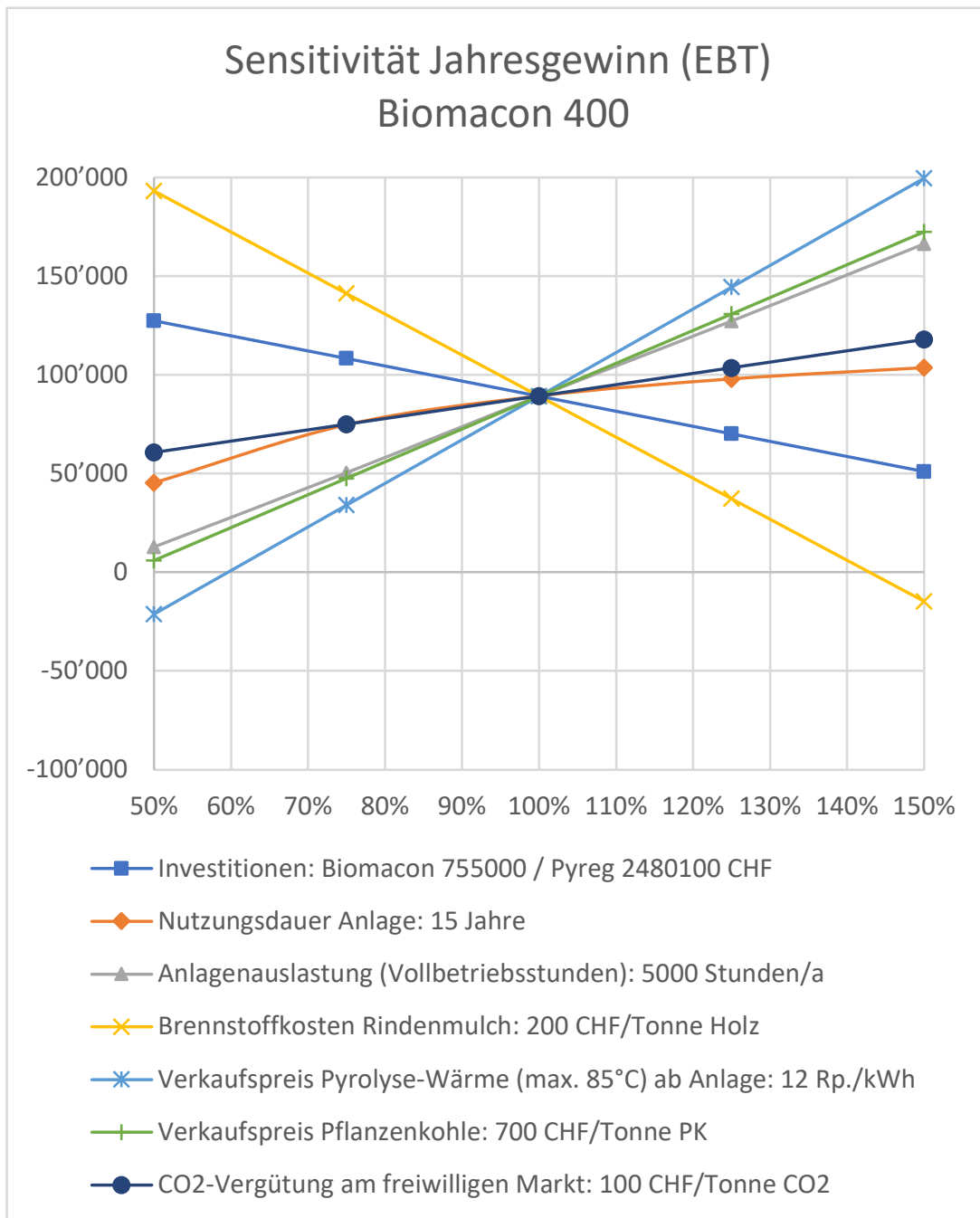


Abbildung 21: Ergebnis der Sensitivitätsberechnung der Biomacon 400 Anlage für sechs Parameter. Eine prozentuale Variation der Brennstoffkosten und des Wärme-Verkaufspreises haben den grössten Effekt auf den Jahresgewinn. Erstaunlich wenig sensitiv wirken die CO2-Vergütungen auf den Gewinn. Die Werte in der Legende zu den einzelnen Parametern stehen jeweils für 100%.

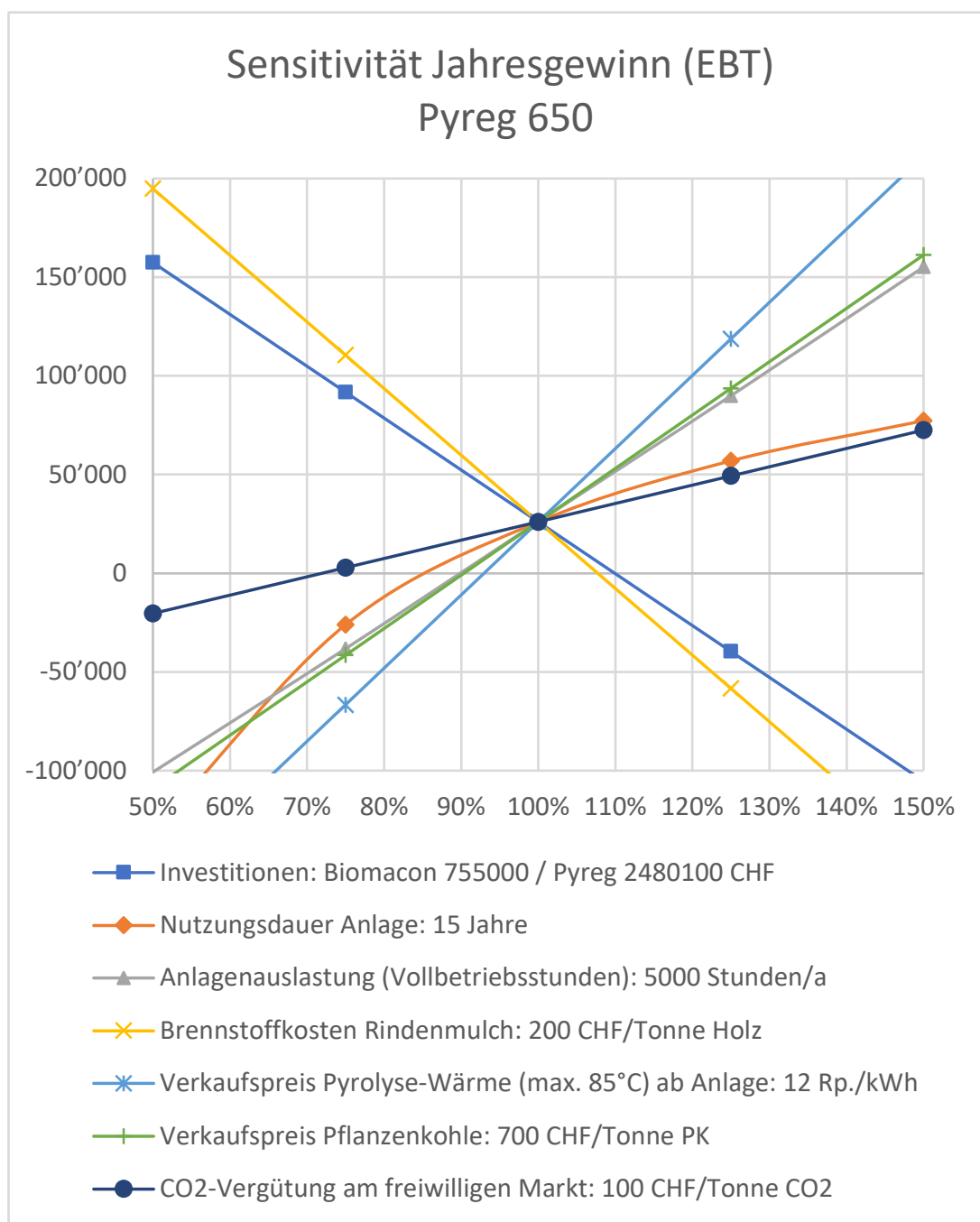


Abbildung 22: Ergebnis der Sensitivitätsberechnung der Pyreg 650 Anlage für sechs Parameter. Eine prozentuale Variation der Brennstoffkosten und des Wärme-Verkaufspreises haben den grössten Effekt auf den Jahresgewinn. Erstaunlich wenig sensitiv wirken die CO2-Vergütungen auf den Gewinn. Die Werte in der Legende zu den einzelnen Parametern stehen jeweils für 100%. Generell verhalten sich alle Parameter deutlich sensitiver (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).



6.3 Vermarktungsszenarien Pflanzenkohle generell

Die Vermarktung der Pflanzenkohle generell (unabhängig vom Ausgangssubstrat) und der dadurch erzielbare Preis ist entscheidend für die Wirtschaftlichkeit der untersuchten Pyrolyseanlagen. Aus den Erkenntnissen aus diesem Projekt, Gesprächen mit verschiedenen Praxisanwendern sowie weiteren Untersuchungen von Kaskad-E können folgende Vermarktungsszenarien abgeleitet werden:

Szenario	Vorteile	Nachteile
Zuschlagsstoff Betonindustrie («EBC-Rohstoff»)	▪ Pflanzenkohle als Materialverwendung zugelassen und erfüllt die Materialanforderungen ▪ Sichere CO₂-Senke → Vergütung ▪ Grosser Markt (ein Absatzpartner) ▪ Produkt ist stark affin zu Zement	▪ Zu geringe Zahlungsbereitschaft: Konkurrenzprodukt Sand kostet lediglich 50 CHF/Tonne ▪ Technisch ungelöste Fragen: Staub, Explosionsschutz, Beimischmengen ▪ Bodenpotenzial der Pflanzenkohle ungenutzt
Verwendung als Pflanzsubstrate («EBC-Urban»)	▪ Pflanzenkohle im nicht natürlich gewachsenen Boden zeitnah zulassungsfähig ▪ Sichere CO₂-Senke → Vergütung ▪ Bodenpotenzial der Pflanzenkohle genutzt ▪ Hohe Zahlungsbereitschaft	▪ Viele kleine Abnehmer ▪ Restrisiko Zulassung ▪ Markt wird bereits mit viel Vergaserkohle geflutet
Verwendung als Grillkohle («EBC-Rohstoff»)	▪ Hohe Zahlungsbereitschaft ▪ Ökologisches Substitut der Import-Grillkohle	▪ Viele kleine Abnehmer ▪ Qualität wegen hohem Aschegehalt unsicher ▪ Keine CO₂-Senke ▪ Bodenpotenzial der Pflanzenkohle ungenutzt
Verwendung als Bodenkohle («EBC-Agro»)	▪ Sichere CO₂-Senke → Vergütung ▪ Bodenpotenzial der Pflanzenkohle genutzt	▪ Je nach Substrat nicht zugelassen (kein Holz) ▪ Teilweise zu hohe Kupferkonzentration ▪ Mittlere Zahlungsbereitschaft
Produktion «auf Halde»	▪ Sichere CO₂-Senke → Vergütung ▪ Bodenpotenzial der Pflanzenkohle später nutzbar	▪ Lagervolumen gross und teuer ▪ Risiko, dass Zulassung für Bodenanwendung nie kommt ▪ Risiko der «Beschmutzung» während der Lagerung



Szenario	Vorteile	Nachteile
Verwendung als Futterkohle («EBC-Futter»)	▪ Sichere CO₂-Senke → Vergütung ▪ Bodenpotenzial der Pflanzenkohle genutzt¹⁴ ▪ Sehr hohe Zahlungsbereitschaft	▪ Teilweise zu hohe Zink- oder Kupferkonzentration
Verwendung als Bio-Bodenkohle («EBC-AgroBio»)	▪ Sichere CO₂-Senke → Vergütung ▪ Bodenpotenzial der Pflanzenkohle genutzt ▪ Hohe Zahlungsbereitschaft	▪ Je nach Substrat nicht zugelassen (kein Holz) ▪ Teilweise zu hohe Zink- oder Kupferkonzentration
Verwendung als Konsumkohle («EBC-Gebrauchsmaterial»)	▪ Pflanzenkohle als Materialverwendung zugelassen	▪ Geringe Mengen ▪ Bodenpotenzial der Pflanzenkohle ungenutzt

¹⁴ Sämtliche Futterkohle landet irgendwann im Boden; die im Stall verfütterte Kohle gelangt via Gülle und Mist zu 100% auf landwirtschaftliche Flächen.



7 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.

8 Ausblick und zukünftige Umsetzung

Die Zulassung von Substraten zur Pflanzenkohleherstellung für Bodenanwendungen wird durch das Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) geregelt. Dabei sind derzeit nicht-holzige Substrate für die Herstellung von Pflanzenkohle ausgeschlossen. Auf Nachfrage beim BLW im April 2021 wurde nochmals klar bestätigt, dass diese strikte Beschränkung der Zulassung auf naturbelassenes Holz bestehen bleiben soll. Für Pflanzenkohle als Tierfutter hingegen gelten in der Schweiz die Anforderungen gemäss der Futtermittel-Verordnung (FMV) und der Futtermittelbuch-Verordnung (FMBV). Da «pflanzliche Kohle» in der Liste der Einzelfuttermittel ohne Meldepflicht aufgeführt (Anhang 1.4 FMBV, Referenz 7.13.1) ist, unterliegt die Qualität des Futtermittels der Eigenverantwortung des Herstellers. Es ist keine amtliche Zulassung notwendig [27]. Für Pflanzenkohleanwendungen in Baustoffen gelten die EBC-Qualitätsvorgaben (Anhang 11.1) und die EBC-Positivliste (Anhang 11.7). In dieser sind alle im Rahmen dieser Studie untersuchten Substrate aufgeführt.

Aufgrund der Ergebnisse der vorliegenden Studie kann folgende Anwendungsmatrix für Pflanzenkohle abgeleitet werden. Weiterführende Studien sollten einzelne Ergebnisse erhärten, Empfehlungen bzgl. ökologischem Optimum vertiefen und die Beurteilungsgrundlagen erweitern. Dazu sollten alle zuständigen Amtsstellen involviert werden.



Substrattyp	Anwendung Pflanzenkohle			Beurteilungs- grundlagen
	empfohlen	nicht empfohlen ¹⁵	zu verbieten	
Holz, unbelastet	Boden Land- und Forstwirtschaft	Baustoffe		LRV, EBC
Holz, unbelastet, aschereich	Boden Land- und Forstwirtschaft, Futter	Baustoffe		LRV, EBC
Holz, belastet	Baustoffe, Substrate (je nach Belastung)		Boden Land- und Forstwirtschaft, Futter	LRV, EBC
Nicht-Holz, Ernterückstände	Boden Land- und Forstwirtschaft, Futter		Baustoffe	LRV, EBC, kumulierte Gesamtfracht an Schadstoffen
Nicht-Holz, Abfälle Futter- und Nahrungsmittel	Boden Land- und Forstwirtschaft, Futter			LRV, EBC, kumulierte Gesamtfracht an Schadstoffen
Nicht-Holz, weitere Biomassen	Baustoffe, Substrate (je nach Belastung)	Futter	Boden Land- und Forstwirtschaft	LRV, EBC

9 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Bei der Bearbeitung der Meilensteine von vorliegender Studie sind zwei Zwischenberichte entstanden. Diese wurden mit Projektgruppen der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW) geteilt, um bei der Pflanzenkohleforschung Doppelspurigkeiten zu vermeiden und Synergien zu nutzen. Die Ergebnisse der Studie werden zudem aktiv mit den Pflanzenkohlefachverbänden im DACH-Raum geteilt und diskutiert. Eine Posterpräsentation der Ergebnisse ist konkret an der internationalen Fachtagung des deutschen Fachverbandes Pflanzenkohle am 7./8. November 2022 in Darmstadt geplant.

¹⁵ Diese Nicht-Empfehlung bedeutet nicht, dass diese Anwendungen schlecht wären, doch sie verhindern das ökologische Optimum. So wird beispielsweise bei Verwendung von bester Pflanzenkohle als Baustoffzuschlag nur die CO₂-Speicherung erreicht, das Bodenpotenzial (Verbesserung Wasser- und Nährstoffspeicherung) bleibt ungenutzt.



10 Literaturverzeichnis

- BAFU. 2007. 'Holznutzungspotenziale Im Schweizer Wald, Auf Basis LFI3'.
- BAFU. 2019. 'Kompostier- Und Vergärungsanlagen Erhebung in Der Schweiz Und Lichtenstein'.
- BFE. 2012. 'Ökobilanzen zur Biomasseverwertung'.
- BFE. 2017. 'Energiegewinnung aus Biomassepellets'.
- BFE. 2019. 'Staubförmiger Biomasse-Brennstoff Für den Thermoölprozess'.
- BFS. 2017. 'Forstwirtschaft der Schweiz Taschenstatistik 2017'.
- Brtnicky, Martin, Rahul Datta, Jiri Holatko, Lucie Bielska, Zygmunt M. Gusiati, Jiri Kucerik, Tereza Hammerschmidt, et al. 2021. 'A Critical Review of the Possible Adverse Effects of Biochar in the Soil Environment'. *Science of The Total Environment* 796 (November): 148756. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148756>.
- Der Bundesrat. 2020. 'Von Welcher Bedeutung Könnten Negative CO2-Emissionen Für Die Künftigen Klimapolitischen Massnahmen Der Schweiz Sein?'.
- Dinkel. 2013. 'Skript Ökobilanzen Lebenszyklusanalyse Life Cycle Analysis'.
- EBC. 2012-2022. 'European Biochar Certificate – Richtlinien für die Zertifizierung von Pflanzenkohle', Ithaka Institute, Arbaz, Switzerland. <http://www.european-biochar.org> Version 10.1G vom 10. Januar 2022
- Gottstein, Vera, Mara Bernhardt, Elena Dilger, Judith Keller, Carmen M. Breitling-Utzmann, Steffen Schwarz, Thomas Kuballa, Dirk W. Lachenmeier, and Mirko Bunzel. 2021. 'Coffee Silver Skin: Chemical Characterization with Special Consideration of Dietary Fiber and Heat-Induced Contaminants'. *Foods* 10 (8): 1705. <https://doi.org/10.3390/foods10081705>.
- Gupta, Souradeep, Harn Wei Kua, and Chin Yang Low. 2018. 'Use of Biochar as Carbon Sequestering Additive in Cement Mortar'. *Cement and Concrete Composites* 87 (March): 110–29. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.009>.
- Hartmann, H, T Böhm, and L Maier. 2000. 'Naturbelassene Biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften Und Einflussmöglichkeiten. Reihe „Materialien“, Bd 154.'
- Kaltschmitt, Martin, Hans Hartmann, and Hermann Hofbauer, eds. 2016. *Energie aus Biomasse: Grundlagen, Techniken und Verfahren. 3., aktualisierte und erweiterte Auflage*. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg.
- Keel, Andreas. 2016. 'Neue Biomasse-Brennstoffe'
- Lehmann, Johannes, and Stephen Joseph, eds. 2015. 'Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Polychlorinated Aromatic Compounds in Biochar'. In *Biochar for Environmental Management*, 0 ed., 627–56. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264-28>.
- Mensah, Rhoda Afriyie, Vigneshwaran Shanmugam, Sreenivasan Narayanan, Seyed Mohammad Javad Razavi, Adrian Ulfberg, Thomas Blanksvärd, Faez Sayahi, et al. 2021. 'Biochar-Added Cementitious Materials—A Review on Mechanical, Thermal, and Environmental Properties'. *Sustainability* 13 (16): 9336. <https://doi.org/10.3390/su13169336>.
- Oldfield, Thomas L., Nataša Sikirica, Claudio Mondini, Guadalupe López, Peter J. Kuikman, and Nicholas M. Holden. 2018. 'Biochar, Compost and Biochar-Compost Blend as Options to Recover Nutrients and Sequester Carbon'. *Journal of Environmental Management* 218 (July): 465–76. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.04.061>.



Pyreg GmbH. 2022. 'Carbonization - Our Technology Our Solutions: PYREG'. 2022. <https://pyreg.com/our-technology/>.

Schmidt, Hans-Peter, Nikolas Hagemann, Fredy Abächerli, Jens Leifeld, and Thomas Bucheli. 2021. 'Pflanzenkohle in der Landwirtschaft. Hintergründe zur Düngertilassung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken'. Agroscope. <https://doi.org/10.34776/AS112G>.

Shen, Xiuli, Haibo Meng, Yujun Shen, Jingtao Ding, Haibin Zhou, Hongbin Cong, and Lijie Li. 2021. 'A Comprehensive Assessment on Bioavailability, Leaching Characteristics and Potential Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Biochars Produced by a Continuous Pyrolysis System'. Chemosphere 287: 132116. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132116>.

Sørmo, Erlend, Ludovica Silvani, Gorm Thune, Helmut Gerber, Hans Peter Schmidt, Andreas Botnen Smebye, and Gerard Cornelissen. 2020. 'Waste Timber Pyrolysis in a Medium-Scale Unit: Emission Budgets and Biochar Quality'. Science of The Total Environment 718 (May): 137335. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137335>.

Thees, O., V. Burg, M. Erni, G. Bowman, and R. Lemm. 2017. 'Biomassepotenziale Der Schweiz Für Die Energetische Nutzung, Ergebnisse des Schweizerischen Energiekompetenzzentrums SCCER BIOSWEET'.

Wang, Min, Fanmei Kong, Rui Liu, Qingqi Fan, and Xiaocun Zhang. 2020. 'Zinc in Wheat Grain, Processing, and Food'. Frontiers in Nutrition 7 (August): 124. <https://doi.org/10.3389/fnut.2020.00124>.



11 Anhang

11.1 Grenzwerte Pflanzenkohle: European Biochar Certificate (EBC)

Tabelle 24: Übersicht über die wichtigsten analytischen Parameter für EBC Pflanzenkohle. Angepasst nach (EBC, 2012-2022) (Version 10.1)

EBC-Zertifizierungs-kategorie		EBC-Futter	EBC-AgroBio	EBC-Agro	EBC-Urban	EBC-Gebrauchs-material	EBC-Rohstoff
Elementaranalyse	Angabe von Ctot, Corg, H, N, O, S, Asche						
	H/Corg	< 0.7					
Physikalische Parameter	Wassergehalt, Trockensubstanz, Schüttdichte (@ < 3mm Partikelgröße), WHC, pH, Salzgehalt, elektrische Leitfähigkeit des Feststoffes						
TGA	Muss für das erste Batch einer Pyrolyseanlage vorgelegt werden.						
Nährstoffe	Angabe von N, P, K, Mg, Ca, Fe						
Schwermetalle	Pb	10 g t-1 (88% TS)	45 g t-1 TS	120 g t-1 TS	120 g t-1 TS	120 g t-1 TS	Pflichtangabe, keine Grenzwerte für die Zertifizierung
	Cd	0.8 g t-1 (88% TS)	0.7 g t-1 TS	1.5 g t-1 TS	1.5 g t-1 TS	1.5 g t-1 TS	
	Cu	70 g t-1 TS	70 g t-1 TS	100 g t-1 TS	100 g t-1 TS	100 g t-1 TS	
	Ni	25 g t-1 TS	25 g t-1 TS	50 g t-1 TS	50 g t-1 TS	50 g t-1 TS	
	Hg	0.1 g t-1 (88% TS)	0.4 g t-1 TS	1 g t-1 TS	1 g t-1 TS	1 g t-1 TS	
	Zn	200 g t-1 TS	200 g t-1 TS	400 g t-1 TS	400 g t-1 TS	400 g t-1 TS	
	Cr	70 g t-1 TS	70 g t-1 TS	90 g t-1 TS	90 g t-1 TS	90 g t-1 TS	
	As	2 g t-1 (88% TS)	13 g t-1 TS	13 g t-1 TS	13 g t-1 TS	13 g t-1 TS	
Organische Schadstoffe	16 EPA PAK	Deklaration	4±2 g t-1 TS	6.0+2.2 g t-1 TS	Deklaration	Deklaration	nicht erforderlich
	8 EFSA PAK	1.0 g t-1 TS					4 g t-1 TS
	Benzo[e]pyren Benzo[a]fluoranthen	< 1.0 g t-1 TS für jede der beiden Substanzen					
	PCB, PCDD/F	Siehe Kapitel 10	Einmalige Analyse für erstes Batch einer Produktionsanlage. Für PCB: 0.2 mg kg-1 TS, für PCDD/F: 20 ng kg-1 (I-TEQ OMS).				



11.2 Messverfahren

11.3 Weitere Messergebnisse

XRF-Analysen (englisch X-Ray Fluorescence spectroscopy): Messmethode sehr ungenau, nur relativ und nicht absolut beurteilbar.

Substrat	Chlor	Chrom	Eisen	Kupfer	Blei
	Cl	Cr	Fe	Cu	Pb
	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
Holzhackschnitzel	<lod	<lod	413	576	98
Pferdemist	6'056	<lod	16'049	1'140	185
Pferdemist (PCDD/F-Messung)	11'458	<lod	31'770	1'474	244
Gerstenabgang	3'108	<lod	3'394	1'101	213
Weizenkleie	1'521	<lod	1'063	543	166
Kaffeeabfälle	536	<lod	1'426	847	80
Rinde	<lod	<lod	204	1'068	202
Holz-Vergärung	982	<lod	25'136	1'096	222
Holz-Vergärung (PCDD/F-Messung)	6'803	<lod	12'477	542	182
Holz-Kompostierung	3'897	<lod	18'784	1'126	222

<lod: < limit of detection (unter der Nachweisgrenze)

Tabelle 25: Übersicht chemische Substratmerkmale, XRF-Analysen. Bei Weizenkleie liegen sämtliche Werte um Faktor 2 unter jenen des Gerstenabgangs (verringerte Dioxinbildung erwartet).



11.4 Wirkungsabschätzungsmethoden

11.4.1 GWP20/100

Die CO₂-Bilanz (auch CO₂-Fußabdruck, Treibhausgasbilanz, u.a.) ist ein Maß für den Gesamtbetrag von Kohlenstoffdioxid-Emissionen, der direkt bzw. indirekt durch Aktivitäten oder Lebensstadien von Unternehmen, Produkten oder Personen entstehen bzw. verursacht werden. Neben Kohlenstoffdioxid werden auch andere Treibhausgase bilanziert. Die Methode verwendet Faktoren des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ("IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change," n.d.) und hat als Einheit CO₂-Äquivalente (kurz CO₂e) (siehe Tabelle 26). In dieser Studie wird der Standardbetrachtungszeitraum von 100 Jahren verwendet.

Tabelle 26: Auswahl von Treibhausgasemissionen und deren Faktoren relativ zu CO₂

	Half-life (years)	GWP time horizon	
		20 years	100 years
Carbon dioxide (CO ₂)	Complex	1	1
Methane (CH ₄)	12.4	84	28
Nitrous oxide (N ₂ O)	121	264	265
HFC-23	222	10,800	12,400
HFC-134a	13.4	3710	1300
CF ₄ (PFC)	50,000	4880	6630
Sulfur hexafluoride (SF ₆)	3200	17,500	23,500
Nitrogen trifluoride (NF ₃)	500	12,800	16,100

11.4.2 Umweltbelastungspunkte (Methode der ökologischen Knappheit)

Die Methode der ökologischen Knappheit berücksichtigt ein breites Spektrum von Umweltbelastungen und fasst diese durch Vollaggregation in einer Kennzahl zusammen. Das Ergebnis sind Umweltbelastungspunkte (UBP). Zentrale Grösse der Methode sind die Ökofaktoren, welche die Umweltbelastung einer Schadstoffemission resp. Ressourcenentnahme in der Einheit UBP pro Mengeneinheit angeben. Der Ökofaktor eines Stoffes leitet sich aus der Gesetzgebung oder entsprechenden politischen Zielen ab. Je mehr die aktuellen Emissionen resp. der Ressourcenverbrauch das gesetzte Umweltschutz-Ziel überschreiten, desto grösser wird der Ökofaktor, ausgedrückt in UBP (Frischknecht and Büsser Knöpfel 2013).

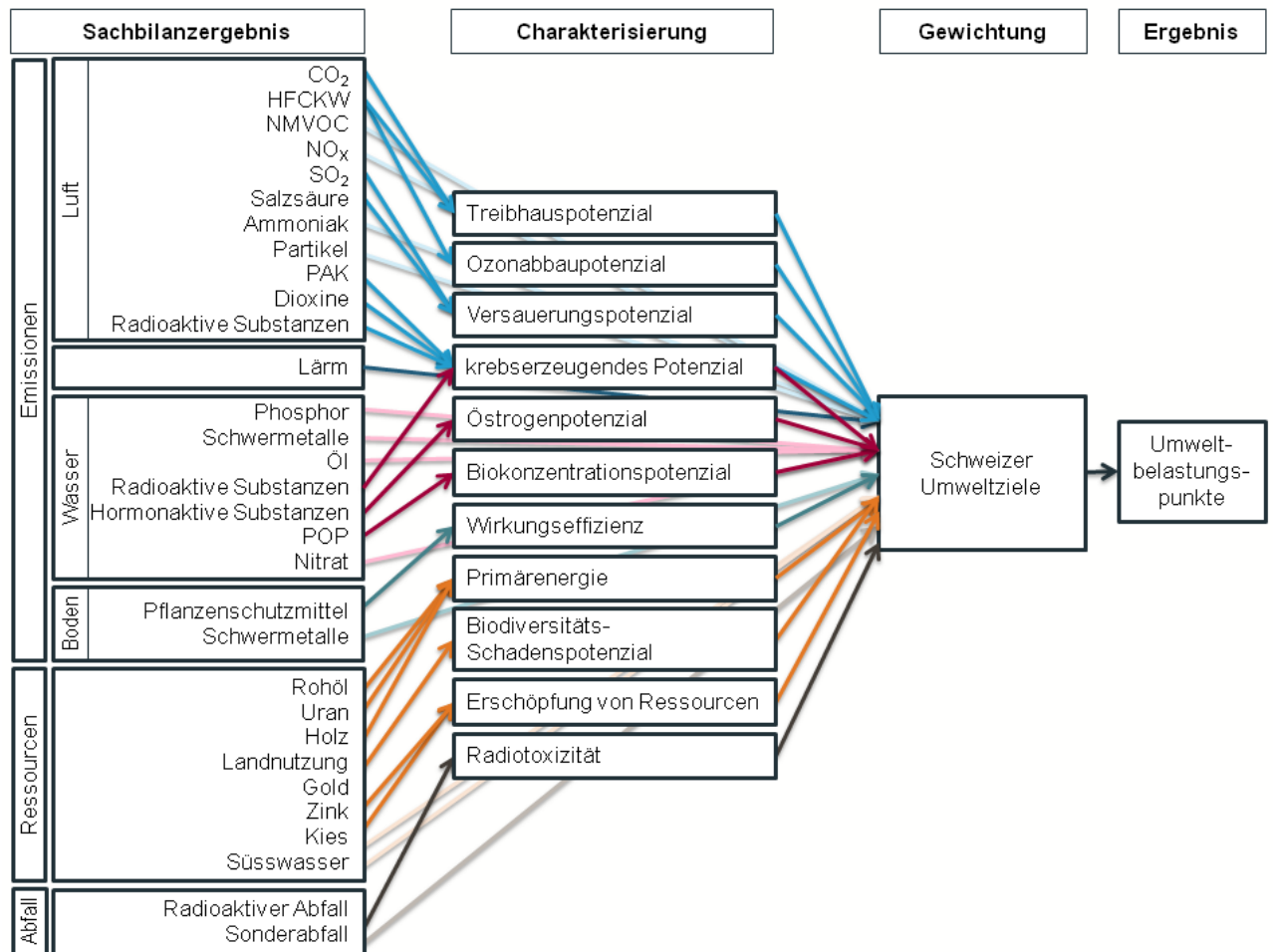


Abbildung 23: Struktur der Wirkungsabschätzungsmethode Umweltbelastungspunkte (Frischknecht and Büsser Knöpfel 2013)



11.5 Sachbilanz

11.5.1 Pyrolyse-Anlagen

Tabelle 27: Sachbilanz der Pyreg-Anlage pro kg Substrat

PYREG-Anlage	Wert	Einheit	Quelle
Stahl	5.16E-04	kg	Jungbluth et al. 2020
Maschinen	1.11E-03	kg	Jungbluth et al. 2020
Elektrokomponenten	1.56E-06	kg	Jungbluth et al. 2020
Gebäude	1.61E-07	m2	Jungbluth et al. 2020
Walzen	5.16E-04	kg	Jungbluth et al. 2020
Transport LKW	1.63E-04	tkm	Jungbluth et al. 2020
Transport Zug CH	9.78E-04	tkm	Jungbluth et al. 2020
Stahlentsorgung	5.16E-04	kg	Jungbluth et al. 2020
Landnutzung	1.56E-08	p	Jungbluth et al. 2020
Strommix CH	1.41E-01	kWh	Jungbluth et al. 2020
Erdgas CH	4.22E-02	MJ	Jungbluth et al. 2020

Tabelle 28: Sachbilanz der PyroFarm-Anlage pro kg Substrat

PyroFarm-Anlage	Wert	Einheit	Quelle
Stahl	2.28E-04	kg	Interview mit Experten
Building hall	2.82E-07	m2	Interview mit Experten
Walzen	2.28E-04	kg	Interview mit Experten
Transport LKW	1.14E-05	tkm	Annahme
Transport Zug CH	1.14E-05	tkm	Annahme
Stahlentsorgung	2.28E-04	kg	Interview mit Experten
Landnutzung	1.30E-09	m2a	Annahme
Strommix CH	1.41E-01	kWh	Annahme
Erdgas CH	4.22E-02	MJ	Annahme



Tabelle 29: Sachbilanz der PyroTube-Anlage pro kg Substrat

PyroTube-Anlage	Wert	Einheit	Quelle
Stahl	4.54E-06	kg	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Maschinen	9.77E-06	kg	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Elektrokomponenten	1.38E-08	kg	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Gebäude	1.42E-09	m2	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Walzen	4.54E-06	kg	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Transport LKW	1.43E-06	tkm	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Transport Zug CH	8.60E-06	tkm	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Stahlentsorgung	4.54E-06	kg	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Landnutzung	1.38E-10	p	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Strommix CH	1.41E-01	kWh	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen
Erdgas CH	4.22E-02	MJ	Schätzung aufgrund Verhältnis Heizleistung der Anlagen

11.5.2 Heutige Verwertungspfade

Tabelle 30: Sachbilanz der heutigen Verwertung von Kaffeeabfälle (KH Heute)

Kaffeeabfälle - Heute	Wert	Einheit	Quelle
Transport LKW	5.00E-02	tkm	Annahme
Kompostierung - Prozess	2.80E-01	kg	Dinkel et al. 2012
Streuung	2.80E-01	kg	Dinkel et al. 2012
Kompostierung - Schwermetalle	2.80E-01	kg	Dinkel et al. 2012
Kompostierung - CO ₂	8.00E-01	kg	Dinkel et al. 2012
Gutschrift - N-Dünger	-2.80E-01	kg	Dinkel et al. 2012
Gutschrift - Dünger ohne N	-2.80E-01	kg	Dinkel et al. 2012
Gutsschrift - Boden	-2.80E-01	kg	Dinkel et al. 2012



Tabelle 31: Sachbilanz der heutigen Verwertung von Rinde (RM Heute)

Rinde - Heute	Wert	Einheit	Quelle
Transport LKW	0.05	tkm	Annahme
Abdeckmaterial - Zerkleinerung	0.3	kg	Interview mit Experten
Transport LKW	0.015	tkm	Annahme
Silo	0.000	m3	Interview mit Experten
Transport LKW	0.015	tkm	Annahme
Streuung	0.3	kg	Interview mit Experten
Abdeckmaterial - Gutschrift	-0.3	kg	Interview mit Experten
Transport LKW	0.0028	tkm	Annahme
Kompostierung - Prozess	0.056	kg	Dinkel et al. 2012
Streuung	0.056	kg	Dinkel et al. 2012
Kompostierung - Schwermetalle	0.056	kg	Dinkel et al. 2012
Gutschrift - N-Dünger	-0.056	kg	Dinkel et al. 2012
Gutschrift - Dünger ohne N	-0.056	kg	Dinkel et al. 2012
Gutsschrift - Boden	-0.056	kg	Dinkel et al. 2012
Transport LKW	0.03	tkm	Annahme
Rindenmulch - Verbrennung	3.82	MJ	Berechnung
Strommix CH	-0.35	kWh	Berechnung
Erdgas CH	-3.82	MJ	Berechnung



Tabelle 32: Sachbilanz der heutigen Verwertung von Weizenkleie (WK Heute)

Weizenkleie - Heute	Wert	Einheit	Quelle
Silo	6.3E-10	m3	Berechnung
Pelletiermaschine	6.7E-06	kg	Annahme
Strommix CH	1.2E-01	kWh	Annahme
Dampfbehandlung Maschine	7.1E-05	kg	Annahme
Dampfmaschine	7.1E-05	kg	Annahme
Strommix CH	1.2E-01	kWh	Annahme
Wasser	1.0E+00	kg	Annahme
Kühlungsmaschine	5.5E-08	kg	Annahme
Strommix CH	1.2E-01	kWh	Annahme
Transport LKW	5.0E-02	tkm	Annahme
Silo	6.3E-10	m3	Berechnung
Siebmaschine	3.4E-06	kg	Berechnung
Strommix CH	5.5E-03	kWh	Berechnung
Maschinen	1.5E-05	kg	Berechnung
Strommix CH	1.6E-02	kWh	Berechnung
Gutschrift Kleie	-1.00E+00	kg	Berechnung



11.5.3 Pyrolyse-Szenarien

Tabelle 33: Sachbilanz der Pyrolyse-Szenarien von Rinde (RM PR, RM PF und RM PT)

Rinde	PyroFarm	PyroTube	Pyreg-1500	Einheit	Quelle
Emissionen					
CH ₄ , biogen	1.21E-04	0.00E+00	1.92E-05	kg	Versuche
CO	4.78E-05	6.54E-05	3.55E-05	kg	Versuche
CO ₂	1.26E+00	1.28E+00	1.01E+00	kg	Versuche
DnF	1.22E-14	6.97E-15	6.56E-15	kg	Versuche
PAK	1.04E-09	1.04E-09	1.04E-09	kg	Versuche
N ₂ O	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	kg	Versuche
NO _x	5.62E-03	3.28E-03	1.86E-03	kg	Versuche
PM	0.00E+00	0.00E+00	4.56E-05	kg	Versuche
SO ₂	0.00E+00	6.31E-04	5.56E-04	kg	Versuche
Vertrieb Pflanzenkohle					
Natriumchloride	1.58E-04	1.42E-04	2.37E-04	kg	Jungbluth et al. 2020
Verpackung	6.82E-04	6.14E-04	1.02E-03	kg	Jungbluth et al. 2020
Wasser (decarbonised)	3.79E-02	3.41E-02	5.68E-02	kg	Jungbluth et al. 2020
Transport	9.71E-03	8.74E-03	1.46E-02	tkm	Jungbluth et al. 2020
Streuung	1.62E-01	1.46E-01	2.43E-01	kg	Jungbluth et al. 2020
Gutschrift Pflanzenkohle					
CO ₂ -Senke	-4.49E-01	-4.37E-01	-6.56E-01	kg	Berechnung
Gutschrift Wärme					
Erdgas CH	-6.79E+00	-8.32E+00	-6.79E+00	MJ	Berechnung



Tabelle 34: Sachbilanz der Pyrolyse-Szenarien von Weizenkleie (WK PF und PT)

Weizenkleie	PyroFarm	PyroTube	Einheit	Quelle
Emissionen				
CH ₄ , biogen	5.19E-05	5.63E-05	kg	Versuche
CO	1.09E-04	5.19E-05	kg	Versuche
CO ₂	1.23E+00	1.04E+00	kg	Versuche
DnF	2.07E-13	1.08E-13	kg	Versuche
PAK	3.16E-07	3.16E-07	kg	Versuche
N ₂ O	0.00E+00	0.00E+00	kg	Versuche
NO _x	1.05E-02	4.09E-03	kg	Versuche
PM	8.62E-05	4.47E-05	kg	Versuche
SO ₂	2.29E-03	1.38E-03	kg	Versuche
Vertrieb Pflanzenkohle				
Natriumchloride	1.76E-04	2.46E-04	kg	Jungbluth et al. 2020
Verpackung	7.59E-04	1.06E-03	kg	Jungbluth et al. 2020
Wasser (decarbonised)	4.22E-02	5.91E-02	kg	Jungbluth et al. 2020
Transport	1.08E-02	1.51E-02	tkm	Jungbluth et al. 2020
Streuung	1.80E-01	2.52E-01	kg	Jungbluth et al. 2020
Gutschrift Pflanzenkohle				
CO ₂ -Senke	-4.55E-01	-6.30E-01	kg	Berechnung
Gutschrift Wärme				
Erdgas CH	-8.42E+00	-6.65E+00	MJ	Berechnung



Tabelle 35: Sachbilanz der Pyrolyse-Szenarien von Kaffeeabfälle (KH PF und PT)

Kaffeeabfälle	Pyrofarm	Pyrotube	Einheit	Quelle
Emissionen				
CH ₄ , biogen	1.29E-04	7.90E-05	kg	Versuche
CO	9.31E-05	8.85E-08	kg	Versuche
CO ₂	1.17E+00	1.03E+00	kg	Versuche
DnF	3.79E-14	2.35E-14	kg	Versuche
PAK	8.19E-06	8.19E-06	kg	Versuche
N ₂ O	0.00E+00	0.00E+00	kg	Versuche
NO _x	8.24E-03	5.33E-03	kg	Versuche
PM	2.08E-04	1.28E-04	kg	Versuche
SO ₂	8.28E-04	0.00E+00	kg	Versuche
Vertrieb Pflanzenkohle				
Natriumchloride	1.82E-04	2.46E-04	kg	Jungbluth et al. 2020
Verpackung	7.88E-04	1.06E-03	kg	Jungbluth et al. 2020
Wasser (decarbonised)	4.38E-02	5.91E-02	kg	Jungbluth et al. 2020
Transport	1.12E-02	1.51E-02	tkm	Jungbluth et al. 2020
Streuung	1.87E-01	2.52E-01	kg	Jungbluth et al. 2020
Gutschrift Pflanzenkohle			kg	
CO ₂ -Senke	-4.86E-01	-6.16E-01	kg	Berechnung
Gutschrift Wärme				
Erdgas CH	-7.12E+00	-6.05E+00	MJ	Berechnung



11.6 Dioxin-Katalysatoren

Folgende Firmen/Institute haben Produkte oder Erfahrungen zu Dioxin-Katalysatoren:

- Deutsches Biomasseforschungszentrum
gemeinnützige GmbH
Torgauer Str. 116
D - 04347 Leipzig
www.dbfz.de
www.bfz.de/forschung/forschungsschwerpunkte/katalytische-emissionsminderung
- ELEX AG
Eschenstrasse 6
8603 Schwerzenbach
www.elex.ch/de
- FAQ für GORE® REMEDIA® Katalytische Filtration Systems:
https://www.gore.com/resources/faq-for-gore-remedia-catalytic-filtration-systems?_ga=2.41490466.1295543340.1618324112-587454453.1618324112
- Filterschläuche:
W. L. Gore & Associates GmbH
Hermann-Oberth-Str. 22
85640 Putzbrunn
www.gore.de
GORE® REMEDIA® Filterschläuche – Dioxin/Furan-Reduzierung:
www.gore.de/produkte/dioxin-furan-filterschlaeuche
- Modulare Systeme:
Steuler Anlagenbau GmbH & Co. KG
Georg-Steuler-Str. 1
56203 Höhr-Grenzhausen
service@steuler.de
Katalytischer Dioxine/Furan-Verbrennung: <https://engineering.steuler.de/de/dioxine-furane>



11.7 EBC-Positivliste zulässiger Biomassen zur Herstellung von Pflanzenkohlen

Positivliste zulässiger Biomassen zur Herstellung von Pflanzenkohlen

European Biochar Certificate

Biomassen

Herkunft	Ausgangsmaterial	ID	EBC-Feed	EBC-AgroOrganic	EBC-Agro	EBC-Urban	EBC-ConsumerMaterials	EBC-BasicMaterials	Spezielle Anforderungen und Hinweise
Landwirtschaft: Biomasse von landwirtschaftlichen Betrieben, einschließlich Reststoffen und Biomassen, die gezielt für die Herstellung von Pflanzenkohle angebaut werden.	Einhäufige Energiepflanzen (z.B. Mais, Raps, Zuckerrüben, Sonnenblumen), die spezifisch für die energetische oder stoffliche Biomassennutzung angebaut wurden (NAWARO).	Ag-01	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Für EBC-AgroOrganic nur aus biologischem Anbau. Für C-Senken Zertifizierung muss die Menge der eingesetzten Düngemittel deklariert werden.
	Mehrfährige Energiepflanzen (z.B. Miscanthus, durchwachsene Silphie, Wessenschnitt), die spezifisch für die energetische oder stoffliche Biomassennutzung angebaut werden (NAWARO).	Ag-02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Für EBC-AgroOrganic nur aus biologischem Anbau. Für C-Senken Zertifizierung muss die Menge der eingesetzten Düngemittel deklariert werden.
	Holzige Biomasse aus Kurzumtriebsplantagen (KUP)	Ag-03	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Für EBC-AgroOrganic nur aus biologischem Anbau. Für C-Senken Zertifizierung muss die Menge der eingesetzten Düngemittel deklariert werden.
	Baum-, Reben- und Strauchschnitt	Ag-04	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Insbesondere auf Schwermetalle aus Pflanzenschutzspritzungen achten.
	Ernterückstände wie Stroh, Kraut, Blätter, Spelzen, Strünke	Ag-05	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Insbesondere auf Schwermetalle aus Pflanzenschutzspritzungen achten.
	Altstroh, und Getreidestaub	Ag-06		✓	✓	✓	✓	✓	Arbeitsschutz bei stark staubenden Biomassen beachten.
	Gemüse	Ag-07		✓	✓	✓	✓	✓	Nur Rest- und Abfallstoffe, die nicht oder nicht mehr als Futtermittel verwendet werden können. Für EBC-AgroOrganic nur aus biologischem Anbau
	Saatgut	Ag-08		✓	✓	✓	✓	✓	Dies betrifft nur verfallenes Saatgut. Für EBC-AgroBio nur Saatgut aus biologischem Anbau.
Forstwirtschaft und Holzverarbeitung: Naturbelassene Rinde und Holz, unbehandelt oder mechanisch behandelt, aus forstwirtschaftlichen Betrieben, Sägewerken oder ähnlichen Betrieben	Rinde	F-01	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Holzschäl- und Hackselgut, nur mechanisch behandeltes Holz (reines Feuerholz)	F-02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Nur aus zertifiziertem, nachhaltigem Anbau. Zugelassen ist das FSC und das PEFC-Siegel, weitere auf Antrag.
	Holz, Holzreste aus mechanischer Bearbeitung (Altholz A1)	F-03	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Nur aus zertifiziertem, nachhaltigem Anbau. Zugelassen ist das FSC und das PEFC-Siegel, weitere auf Antrag. Für EBC-Feed: nur aus definierten, gut dokumentierten Quellen, Biomasse aus kommunaler Sammlung nicht erlaubt.
	Sägemehl, Sägespäne, Holzwole aus nicht-chemisch behandeltem Holz	F-04	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Für EBC-Agro, EBC-AgroBio und EBC-Feed nur aus naturbelassenem Holz
Landschaftspflege: Reststoffe, die in Gemeinden, beim Unterhalt von Grundstücken, im Gär-Bau und bei Naturschutzvereinen anfallen	Laub	S-01		✓	✓	✓	✓	✓	Kein Strassenwischgut. Im Betriebshandbuch können besondere Maßnahmen zur Kontrolle des Laubs auf Verunreinigungen bestimmt werden.
	Wurzelstöcke	S-03		✓	✓	✓	✓	✓	Der Erdanteil gilt als Zusatzstoff und darf nicht mehr als 10% der TS betragen.
	Schnittgut aus Naturschutzpflege	S-04	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓	Für EBC-Feed: nur aus definierten, gut dokumentierten Quellen, Biomasse aus kommunaler Sammlung nicht erlaubt.
	Landschaftspflegematerial allgemein	S-05	(✓)	✓	✓	✓	✓	✓	Für EBC-Feed: nur aus definierten, gut dokumentierten Quellen, Biomasse aus kommunaler Sammlung sowie Straßenbegleitgrün nicht erlaubt.
Recycling-Wirtschaft: Restbiomasse, organische Rückstände und Abfälle aus industriellen Prozessen ("definierte Quellen") oder aus der Sammlung/Trennung durch spezialisierte Recyclingunternehmen	Urbanes Grüngut	R-01		✓	✓	✓	✓	✓	Ohne Rüst- und sonstige Abfälle aus Biomasseverarbeitung
	Altpapier	R-02			(✓)	(✓)	✓	✓	Für EBC-Agro nur Teilsortimente (Papier mit geringem mineralischem Füllstoffanteil und ohne Lacke) und mit geringen Fremdstoffanteile: Gesamtgehalt an synthetischen Beschichtungen, Lacken und Kunststoffverunreinigungen max. 1% (10% für EBC-ConsumerMaterials und EBC-BasicMaterials, bei Überschreitung der 1%-Grenze ist eine Einzelgenehmigung erforderlich), nähere Regelungen werden bei Bedarf im Betriebshandbuch getroffen.
	Unbehandeltes Altholz, Sägespäne, Rinde, Holzwole (Altholz Klasse A1)	R-03		✓	✓	✓	✓	✓	
	Behandeltes Altholz (geleimt, gestrichen, beschichtet) ohne PVC oder Schwermetallanreicherung oder Holzschutzmittel (Altholz Klasse A2)	R-04			(✓)	(✓)	✓	✓	Für EBC-Agro und EBC-Urban nur Teilsortimente aus definierten Quellen (z.B. reine Sperrholzabfälle) ohne Beschichtung und max. 1% synthetisches Bindemittel (Klebstoff). Synthetisches Bindemittel und Beschichtung dürfen in Summe 10% für EBC-ConsumerMaterials und EBC-BasicMaterials nicht überschreiten, bei Überschreitung der 1%-Grenze ist eine Einzelgenehmigung erforderlich, nähere Regelungen werden bei Bedarf im Betriebshandbuch getroffen.
	Behandeltes Altholz (geleimt, gestrichen, beschichtet) mit PVC-Anteilen und/oder Schwermetallanreicherung, ohne Holzschutzmittel (Altholz Klasse A3)	R-05				(✓)	(✓)	✓	Für EBC-Urban und EBC-ConsumerMaterials ist eine Einzelzulassung erforderlich. Synthetische Bindemittel, Beschichtungen und/oder Kunststoffverunreinigungen dürfen bei EBC-Urban 1% und bei EBC-ConsumerMaterials/EBC-BasicMaterials 10% nicht überschreiten, nähere Regelungen werden bei Bedarf im Betriebshandbuch getroffen und können insbesondere häufigere Analysen auf PCDD/F und Schwermetalle umfassen.
	Altholz mit Holzschutzmitteln (Altholz Klasse A4)	R-06				(✓)	(✓)	✓	Für EBC-Urban und EBC-ConsumerMaterials ist eine Einzelzulassung erforderlich. Der Hersteller muss den vollständigen thermischen Abbau von Holzschutzmitteln durch die angewandten Pyrolysebedingungen nachweisen. Synthetische Bindemittel, Beschichtungen und/oder Kunststoffverunreinigungen dürfen bei EBC-Urban insgesamt 1% und bei EBC-ConsumerMaterials sowie EBC-BasicMaterials insgesamt 10% nicht überschreiten, nähere Regelungen werden bei Bedarf im Betriebshandbuch getroffen und können insbesondere häufigere Analysen auf PCDD/F und Schwermetalle umfassen.
	Reststoffe aus industrielle Biomasseverarbeitung	R-07		(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	(✓)	Jeder einzelne Reststoff muss von der EBC bewertet werden. Es muss eine Sondergenehmigung erteilt werden, welche die Zusatzstoffe, Verarbeitung und Kontrolle regelt. R-07-Ausgangsstoffe sind nur mit der unterzeichneten EBC-Prozessbewertung zugelassen.
	Papierfaserschlämm	R-08		✓	✓	✓	✓	✓	Nur aus chemisch unbehandelten Holzfasern, eine Schadstoffanalyse des Papierfaserschlammes muss vorliegen
Küchen- und Kantinenabfälle	Küchen-, Kantinen und Restanrückstände	K-01			✓	✓	✓	✓	Verunreinigung durch Plastik darf 1% nicht überschreiten (10% für EBC-ConsumerMaterials und EBC-BasicMaterials, Einzelgenehmigung erforderlich).
Nahrungs- und Genussmittelverarbeitung auf pflanzlicher Basis: aus Lebensmittelhandwerk und -industrie, dem Lebensmittelgroßhandel, Supermärkten, Convenience Stores usw.	Material aus Wasch-, Reinigungs-, Schäl-, Zentrifugier- und Abtrennprozessen	N-01		✓	✓	✓	✓	✓	Der Erd- oder Sandanteil gilt als Zuschlagstoff und darf 10 % der TM nicht überschreiten.
	Trester, Kerne, Schalen, Schrote oder Pressrückstände (z.B. von Ölmühlen, Treber)	N-02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Überlagerte Nahrungs-, Lebens- und Genussmittel	N-03		✓	✓	✓	✓	✓	Nur pflanzliche Lebensmittel. Die Verunreinigung durch Plastik darf 1% nicht überschreiten (10% für EBC-ConsumerMaterials und EBC-BasicMaterials, Einzelgenehmigung erforderlich).
	Fabrikationsrückstände aus der Herstellung von Nahrungsmittelkonserven	N-04		✓	✓	✓	✓	✓	nur rein pflanzliche Rückstände
	Wurzmittelrückstände	N-05	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Rückstände aus der Kartoffel-, Mais- oder Reistärkeherstellung	N-06	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Obst-, Getreide- und Kartoffelschlempen, Alkoholbrennereirückstände	N-07	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Malttreber-keime und -staub aus der Bierproduktion Hopfentreber, Trub und Schlämm aus Brauereien	N-08	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Trester, Weintrub, Schlämm aus der Weinbereitung	N-09	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Tabak, Tabakstaub, -grus, -rippen, -schlämm	N-10		✓	✓	✓	✓	✓	
	Tee- und Kaffeesatz	N-11		✓	✓	✓	✓	✓	
	Früchte	N-12	✓	✓	✓	✓	✓	✓	

	Melasserückstände	N-13	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	Speisepilzsubstrate	N-15		✓	✓	✓	✓	✓	Die Anrechenbarkeit für EBC-C-Senken muss separat geprüft werden, Kohlenstoff aus Torf darf nicht angerechnet werden.
	Rückstände aus der Verarbeitung von Kaffee (Silberhäutchen), Kakao (Pressrückstände) oder Tee	N-16	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Bewirtschaftung von Gewässern	Rechengut, Schwemmgut, Abfischgut, Mähgut	W-01		✓	✓	✓	✓	✓	Die Verunreinigung durch Plastik darf 1% nicht überschreiten (10% für EBC-ConsumerMaterials und EBC-BasicMaterials, Einzelgenehmigung erforderlich).
	Wasserpflanzen	W-02	✓	✓	✓	✓	✓	✓	Für EBC-Futter: nur aus Aquakultur oder spezieller Sammlung von Wasserpflanzen, um Verunreinigungen streng zu vermeiden.
Textilindustrie	Zellulose-, Baumwoll- und Pflanzenfasern	T-01		✓	✓	✓	✓	✓	Der Anteil an Kunefasern darf maximal 1% (EBC-Material: 15%) betragen. Für AgroBio dürfen die Fasern nicht gefärbt oder anderweitig chemisch behandelt sein.
	Fasern von Hanf, Sisal, etc.	T-02		✓	✓	✓	✓	✓	
Biogasanlagen	Nicht tierische Gärreste	G-01		(✓)	✓	✓	✓	✓	Der Anteil an tierischem Ausgangsmaterial für die Biogasanlage muss weniger als 40% betragen. Die Verunreinigung des Gärrestes durch Kunststoffe darf 1% nicht überschreiten (10% für EBC-ConsumerMaterial und EBC-BasicMaterials, Einzelgenehmigung erforderlich). Für EBC-AgroBio dürfen nur Gärreste aus landwirtschaftlichen Biomassen oder für die EBC-AgroBio Produktion zugelassenen Biomassen verwendet werden.

Zuschlagstoffe

Zuschlagstoffe dienen der Verbesserung der Pyrolysebedingungen und Pflanzenkohle-Qualität. Ihr Anteil an der pyrolysierten Biomasse darf insgesamt 10% TM nicht übersteigen. Höhere Dosierungen erfordern einen Einzelgenehmigung.

Gruppe	Ausgangsmaterialien								Spezielle Anforderungen
Mineralisch-organische Bestandteile	Kalk	Z-01		✓	✓	✓	✓	✓	
	Bentonit	Z-02		✓	✓	✓	✓	✓	
	Gesteinsmehle	Z-03		✓	✓	✓	✓	✓	
	Ton	Z-04		✓	✓	✓	✓	✓	
	Lehm	Z-05		✓	✓	✓	✓	✓	
	Boden	Z-06		✓	✓	✓	✓	✓	
	Holz- und Pflanzenaschen	Z-07		✓	✓	✓	✓	✓	Nur zertifizierte Aschen. Zugelassen sind RAL-gütesicherte Aschen (Dünger und Düngerausgangsstoff), weitere ggf. auf Antrag. Betriebshandbuch kann zusätzliche Analysen und Grenzwerte für die Asche (in der Schweiz) umfassen.

Die Aufnahme weiterer, in der Positivliste nicht aufgeführter Biomassen und Zuschlagstoffe kann beim Ithaka Institut beantragt werden.

Die Entscheidung über die Aufnahme in die Positivliste sowie mögliche Zusatzanforderungen werden vom wissenschaftlichen Beirat des EBC entschieden.

Bei schwierigen Entscheidungen wie z.B. Klärschlamm oder Viehmist wird ein wissenschaftliches Gutachten erstellt.

Alle Entscheidungen werden begründet und auf der EBC-Webseite publiziert.



11.8 Laborergebnisse Eurofins

Eurofins Umwelt Ost GmbH - Lindenstraße 11
Gewerbegebiet Freiberg Ost - D-09627 - Bobritzsch-Hilbersdorf

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Hochschule für Technik
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
Klosterzelgstrasse 2
5210 Windisch
SCHWEIZ

Titel: Prüfbericht zu Auftrag 12028789
Prüfberichtsnummer: AR-20-FR-029720-01

Auftragsbezeichnung: PyroChar Analyse Proben 1, 2

Anzahl Proben: 3
Probenart: Pflanzenkohle
Probenahmedatum: 22.05.2020, 23.06.2020, 03.02.2020
Probenehmer: Auftraggeber

Probeneingangsdatum: 14.08.2020
Prüfzeitraum: 14.08.2020 - 08.09.2020

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfgegenstände. Sofern die Probenahme nicht durch unser Labor oder in unserem Auftrag erfolgte, wird hierfür keine Gewähr übernommen. Dieser Prüfbericht enthält eine qualifizierte elektronische Signatur und darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen in jedem Einzelfall der Genehmigung der EUROFINS UMWELT.

Es gelten die Allgemeinen Verkaufsbedingungen (AVB), sofern nicht andere Regelungen vereinbart sind. Die aktuellen AVB können Sie unter <http://www.eurofins.de/umwelt/avb.aspx> einsehen.

Das beauftragte Prüflaboratorium ist durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage (D-PL-14081-01-00) aufgeführten Umfang.

Dr. Sabine Bandemer
Prüfleitung
Tel. +49 37312076608

Digital signiert, 09.09.2020
Sabine Bandemer
Prüfleitung



Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung		Holzhackschnitzel V1		Kaffeeabfallpellets V1		Pferdemistpellets V1	
					Probenahmedatum/ -zeit	22.05.2020		23.06.2020		03.02.2020		
					Probennummer	120109701		120109702		120109703		
					BG	Einheit	anl	wf	anl	wf	anl	wf
Eigenschaften der Pflanzenkohle												
spezifische Oberfläche (BET)	SND2/f			DIN ISO 9277		m²/g	-	359.48	-	6.27	-	177.72
Gesamtwassergehalt	FR	JE02		DIN 51718: 2002-06	0.1	Ma.-%	3.6	-	6.6	-	4.4	-
Aschegehalt (550°C)	FR	JE02		DIN 51719: 1997-07	0.1	Ma.-%	6.6	6.9	26.8	28.7	18.3	19.2
Kohlenstoff	FR	JE02		DIN 51732: 2014-07	0.2	Ma.-%	86.3	89.5	62.2	66.6	69.9	73.1
Kohlenstoff, organisch	FR	JE02		berechnet		Ma.-%	86.1	89.2	60.8	65.1	69.3	72.5
Wasserstoff	FR	JE02		DIN 51732: 2014-07	0.1	Ma.-%	1.3	1.3	0.7	0.8	1.4	1.4
Stickstoff, gesamt	FR	JE02		DIN 51732: 2014-07	0.05	Ma.-%	0.37	0.38	2.94	3.14	2.04	2.14
Schwefel, gesamt	FR	JE02		DIN 51724-3: 2012-07	0.03	Ma.-%	< 0.03	< 0.03	0.29	0.31	0.19	0.20
Sauerstoff	FR	JE02		DIN 51733: 2016-04		Ma.-%	2.6	2.7	4.8	5.1	4.4	4.6
TIC	FR	JE02		DIN 51726: 2004-06	0.1	Ma.-%	0.2	0.3	1.4	1.5	0.6	0.6
Carbonate-CO2	FR	JE02		DIN 51726: 2004-06	0.4	Ma.-%	0.9	0.9	5.0	5.4	2.2	2.3
H/C Verhältnis (molar)	FR	JE02		berechnet			0.18	0.18	0.14	0.14	0.24	0.23
H/Corg Verhältnis (molar)	FR	JE02		berechnet			0.18	0.18	0.15	0.15	0.24	0.24
O/C Verhältnis (molar)	FR	JE02		berechnet			0.023	0.023	0.058	0.057	0.047	0.047
pH in CaCl2	FR			DIN ISO 10390: 2005-12			13.1	-	8.7	-	9.5	-
Leitfähigkeit	FR			BGK III. C2: 2006-09	5	µS/cm	297	-	17900	-	3940	-
Salzgehalt	FR			BGK III. C2: 2006-09	0.005	g/kg	1.57	-	94.7	-	20.8	-

Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung		Holzhackschnitzel V1		Kaffeeabfallpellets V1		Pferdemistpellets V1	
Bestimmung aus dem Mikrowellendruckaufschluss nach DIN 22022-1: 2014-07					Probenahmedatum/ -zeit		22.05.2020		23.06.2020		03.02.2020	
					Probennummer		120109701		120109702		120109703	
					BG	Einheit	anl	wf	anl	wf	anl	wf
Bestimmung aus dem Mikrowellendruckaufschluss nach DIN 22022-1: 2014-07												
Arsen (As)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.8	mg/kg	-	< 0.8	-	< 0.8	-	< 0.8
Blei (Pb)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	2	mg/kg	-	< 2	-	< 2	-	< 2
Cadmium (Cd)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	0.2	mg/kg	-	< 0.2	-	< 0.2	-	< 0.2
Kupfer (Cu)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	1	mg/kg	-	6	-	241	-	45
Nickel (Ni)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	1	mg/kg	-	4	-	6	-	335
Quecksilber (Hg)	FR	JE02		DIN 22022-4: 2001-02	0.07	mg/kg	-	< 0.07	-	< 0.07	-	< 0.07
Zink (Zn)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	1	mg/kg	-	529	-	63	-	259
Chrom (Cr)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	1	mg/kg	-	6	-	2	-	722
Bor (B)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	1	mg/kg	-	10	-	109	-	14
Mangan (Mn)	FR	JE02		DIN EN ISO 17294-2: 2005-02	1	mg/kg	-	269	-	226	-	413
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11												
Phosphor als P2O5	FR	JE02		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	1.0	-	2.8	-	16.7
Magnesium als MgO	FR	JE02		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	2.2	-	8.1	-	4.9
Calcium als CaO	FR	JE02		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	18.7	-	18.9	-	11.9
Kalium als K2O	FR	JE02		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	5.7	-	31.1	-	21.4
Natrium als Na2O	FR	JE02		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	0.5	-	0.3	-	3.2
Eisen als Fe2O3	FR	JE02		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	1.7	-	0.7	-	5.6
Silicium als SiO2	FR	JE02		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	53.4	-	2.0	-	26.5
Schwefel als SO3	FR	JE02		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	0.7	-	2.7	-	2.4

Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung		Holzhackschnitzel V1		Kaffeeabfallpellets V1		Pferdemistpellets V1	
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (OS)					Probenahmedatum/ -zeit		22.05.2020		23.06.2020		03.02.2020	
					Probennummer		120109701		120109702		120109703	
					BG	Einheit	anl	wf	anl	wf	anl	wf
Calcium (Ca)	FR	JE02	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09		0.1	Ma.-%	-	0.9	-	3.9	-	1.6
Eisen (Fe)	FR	JE02	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09		0.1	Ma.-%	-	< 0.1	-	0.1	-	0.8
Kalium (K)	FR	JE02	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09		0.1	Ma.-%	-	0.3	-	7.4	-	3.4
Magnesium (Mg)	FR	JE02	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09		0.1	Ma.-%	-	< 0.1	-	1.4	-	0.6
Natrium (Na)	FR	JE02	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09		0.1	Ma.-%	-	< 0.1	-	< 0.1	-	0.4
Phosphor (P)	FR	JE02	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09		0.1	Ma.-%	-	< 0.1	-	0.4	-	1.4
Schwefel	FR	JE02	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09		0.1	Ma.-%	-	< 0.1	-	0.3	-	0.2
Silicium (Si)	FR	JE02	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09		0.1	Ma.-%	-	1.7	-	0.3	-	2.4

Probenbezeichnung		Holzhackschnitzel V1		Kaffeeabfallpellets V1		Pferdemistpellets V1	
Probenahmedatum/ -zeit		22.05.2020		23.06.2020		03.02.2020	
Probennummer		120109701		120109702		120109703	
Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	BG	Einheit	anl	wf
Bestimmung aus dem Toluolextrakt							
Naphthalin	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	5.1
Acenaphthylen	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.6
Acenaphthen	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.1
Fluoren	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Phenanthren	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.3
Anthracen	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.1
Fluoranthren	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.1
Pyren	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.2
Benzo[a]anthracen	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Chrysen	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[b]fluoranthren	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[k]fluoranthren	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[a]pyren	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Indeno[1,2,3-cd]pyren	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Dibenzo[a,h]anthracen	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[ghi]perylene	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1
Summe 16 EPA-PAK exkl.BG	FR	JE02	DIN EN 16181:2019-08		mg/kg	-	6.7

Elemente aus dem alkalischen Aufschluss

Chrom (VI)	FR	JE02	DIN EN 15192: 2007-02	0.5	mg/kg	-	< 0.5	-	< 0.5
Polychlorierte Dibenzodioxine/-furane (17 PCDD/F) mittels GC-HRMS									
2,3,7,8-TetraCDD		GF/f	RE000 F1	0.18	ng/kg TS	-	-	-	< 0.18
1,2,3,7,8-PentaCDD		GF/f	RE000 F1	0.24	ng/kg TS	-	-	-	< 0.24
1,2,3,4,7,8-HexaCDD		GF/f	RE000 F1	0.48	ng/kg TS	-	-	-	< 0.47
1,2,3,6,7,8-HexaCDD		GF/f	RE000 F1	0.48	ng/kg TS	-	-	-	< 0.47
1,2,3,7,8,9-HexaCDD		GF/f	RE000 F1	0.48	ng/kg TS	-	-	-	< 0.47

Probenbezeichnung		Holzhackschnitzel V1		Kaffeeabfallpellets V1		Pferdemistpellets V1	
		22.05.2020		23.06.2020		03.02.2020	
		120109701		120109702		120109703	
Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	BG	Einheit	anl	wf
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDD	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.54	ng/kg TS	-	< 0.53
OctaCDD	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	2.2	ng/kg TS	-	< 2.2
2,3,7,8-TetraCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.32	ng/kg TS	-	1.5
1,2,3,7,8-PentaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.44	ng/kg TS	-	0.44
2,3,4,7,8-PentaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.44	ng/kg TS	-	0.74
1,2,3,4,7,8-HexaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.40	ng/kg TS	-	0.46
1,2,3,6,7,8-HexaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.40	ng/kg TS	-	< 0.40
1,2,3,7,8,9-HexaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.40	ng/kg TS	-	< 0.40
2,3,4,6,7,8-HexaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.40	ng/kg TS	-	< 0.40
1,2,3,4,6,7,8-HeptaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.52	ng/kg TS	-	0.60
1,2,3,4,7,8,9-HeptaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.38	ng/kg TS	-	< 0.38
OctaCDF	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	3.2	ng/kg TS	-	< 3.2
WHO(2005)-PCDD/F TEQ exkl. BG	GF/f	RE000 F1	Interne Methode		ng/kg TS	-	0.435
WHO(2005)-PCDD/F TEQ inkl. BG	GF/f	RE000 F1	Interne Methode	0.92	ng/kg TS	-	1.1
I-TEQ (NATO/CCMS) exkl. BG	GF/f	RE000 F1	Interne Methode		ng/kg TS	-	0.591
I-TEQ (NATO/CCMS) inkl. BG	GF/f	RE000 F1	Interne Methode		ng/kg TS	-	1.16

Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung									
Polychlorierte Biphenyle (12 WHO PCB) mittels GC-HRMS					BG		Einheit		Holzhackschnitzel V1		Kaffeeabfallpellets V1		Pferdemistpellets V1	
					Probenahmedatum/ -zeit		22.05.2020		23.06.2020		03.02.2020			
					Probennummer		120109701		120109702		120109703			
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl		wf		anl		wf		anl	
					anl									

Probenbezeichnung		Holzhackschnitzel V1		Kaffeeabfallpellets V1		Pferdemistpellets V1	
Probenahmedatum/ -zeit		22.05.2020		23.06.2020		03.02.2020	
Probennummer		120109701		120109702		120109703	
Parameter	Lab. Akkr. Methode	BG	Einheit	anl	wf	anl	wf
Polychlorierte Biphenyle (7 PCB) mittels GC-HRMS							
PCB 28	GF/f RE000 F1 Interne Methode	82	ng/kg TS	-	-	-	150
PCB 52	GF/f RE000 F1 Interne Methode	61	ng/kg TS	-	-	-	260
PCB 101	GF/f RE000 F1 Interne Methode	98	ng/kg TS	-	-	-	360
PCB 118	GF/f RE000 F1 Interne Methode	28	ng/kg TS	-	-	-	78
PCB 138	GF/f RE000 F1 Interne Methode	72	ng/kg TS	-	-	-	140
PCB 153	GF/f RE000 F1 Interne Methode	120	ng/kg TS	-	-	-	200
PCB 180	GF/f RE000 F1 Interne Methode	30	ng/kg TS	-	-	-	52
Summe 6 DIN-PCB exkl. BG	GF/f RE000 F1 Interne Methode		µg/kg TS	-	-	-	1.16
Summe 6 DIN-PCB inkl. BG	GF/f RE000 F1 Interne Methode		µg/kg TS	-	-	-	1.16
Summe 7 Indikator PCB exkl. BG	GF/f RE000 F1 Interne Methode		µg/kg TS	-	-	-	1.24
Summe 7 Indikator PCB inkl. BG	GF/f RE000 F1 Interne Methode	460	ng/kg TS	-	-	-	1200

Erläuterungen

BG - Bestimmungsgrenze

anl - Anlieferungszustand

wf - wasserfreier Zustand

Lab. - Kürzel des durchführenden Labors

Akkr. - Akkreditierungskürzel des Prüflabors

Die mit FR gekennzeichneten Parameter wurden von der Eurofins Umwelt Ost GmbH (Bobritzsch-Hilbersdorf) analysiert. Die Bestimmung der mit JE02 gekennzeichneten Parameter ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 D-PL-14081-01-00 akkreditiert.

Die mit GF gekennzeichneten Parameter wurden von der Eurofins GfA Lab Service GmbH (Hamburg) analysiert. Die Bestimmung der mit RE000F1 gekennzeichneten Parameter ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 Dakks D-PL-14629-01-00 akkreditiert.

Die mit SND2 gekennzeichneten Parameter wurden von der Ruhr Lab GmbH (Gelsenkirchen) analysiert.

/f - Die Analyse des Parameters erfolgte in Fremdvergabe.

Eurofins Umwelt Ost GmbH - Lindenstraße 11
Gewerbegebiet Freiberg Ost - D-09627 - Bobritzsch-Hilbersdorf

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Hochschule für Technik
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
Klosterzelgstrasse 2
5210 Windisch
SCHWEIZ

Titel: Prüfbericht zu Auftrag 12101944
Prüfberichtsnummer: AR-21-FR-003694-01

Auftragsbezeichnung: PyroChar Analyse Proben 1, 2

Anzahl Proben: 4
Probenart: Pflanzenkohle
Probenahmedatum: 10.12.2020, 29.10.2020, 01.12.2020, 21.09.2020
Probenehmer: Auftraggeber

Probeneingangsdatum: 22.01.2021
Prüfzeitraum: 22.01.2021 - 09.02.2021

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfgegenstände. Sofern die Probenahme nicht durch unser Labor oder in unserem Auftrag erfolgte, wird hierfür keine Gewähr übernommen. Die Ergebnisse beziehen sich in diesem Fall auf die Proben im Anlieferungszustand. Dieser Prüfbericht enthält eine qualifizierte elektronische Signatur und darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen in jedem Einzelfall der Genehmigung der EUROFINS UMWELT.

Es gelten die Allgemeinen Verkaufsbedingungen (AVB), sofern nicht andere Regelungen vereinbart sind. Die aktuellen AVB können Sie unter <http://www.eurofins.de/umwelt/avb.aspx> einsehen.

Das beauftragte Prüflaboratorium ist durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage (D-PL-14081-01-00) aufgeführten Umfang.

Dr. Sabine Bandemer
Prüfleitung
Tel. +49 37312076608

Digital signiert, 10.02.2021
Sabine Bandemer
Prüfleitung



Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	BG	Einheit	Siebüberlauf Axpo V1		Siebüberlauf Kompost V1		Rindenmulch V1		Gerstenabgang V1	
Eigenschaften der Pflanzenkohle														
spezifische Oberfläche (BET)	SND2/f			DIN ISO 9277		m²/g	-	211.57	-	235.82	-	390.57	-	138.05
Gesamtwassergehalt	FR	RE000 FY		DIN 51718: 2002-06	0.1	Ma.-%	0.8	-	1.4	-	1.5	-	3.2	-
Aschegehalt (550°C)	FR	RE000 FY		DIN 51719: 1997-07	0.1	Ma.-%	41.5	41.8	37.9	38.4	13.6	13.9	19.5	20.1
Kohlenstoff	FR	RE000 FY		DIN 51732: 2014-07	0.2	Ma.-%	54.9	55.4	62.7	63.5	80.7	81.9	68.9	71.2
Kohlenstoff, organisch	FR	RE000 FY		berechnet		Ma.-%	53.7	54.2	61.6	62.4	79.4	80.6	68.8	71.1
Wasserstoff	FR	RE000 FY		DIN 51732: 2014-07	0.1	Ma.-%	0.7	0.7	0.7	0.7	1.4	1.4	1.8	1.8
Stickstoff, gesamt	FR	RE000 FY		DIN 51732: 2014-07	0.05	Ma.-%	0.85	0.85	0.64	0.64	0.65	0.66	2.98	3.07
Schwefel, gesamt	FR	RE000 FY		DIN 51724-3: 2012-07	0.03	Ma.-%	0.13	0.13	0.10	0.10	< 0.03	< 0.03	0.14	0.14
Sauerstoff	FR	RE000 FY		DIN 51733: 2016-04		Ma.-%	5.0	5.1	0.7	0.7	6.3	6.4	3.7	3.8
TIC	FR	RE000 FY		DIN 51726: 2004-06	0.1	Ma.-%	1.2	1.2	1.1	1.1	1.3	1.3	0.1	0.1
Carbonate-CO2	FR	RE000 FY		DIN 51726: 2004-06	0.4	Ma.-%	4.5	4.6	4.0	4.1	4.8	4.9	0.5	0.5
H/C Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY		berechnet			0.16	0.16	0.13	0.13	0.21	0.21	0.30	0.30
H/Corg Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY		berechnet			0.16	0.16	0.13	0.13	0.21	0.21	0.30	0.31
O/C Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY		berechnet			0.068	0.069	0.008	0.008	0.059	0.059	0.040	0.040
pH in CaCl2	FR			DIN ISO 10390: 2005-12			11.7	-	12.2	-	9.1	-	9.7	-
Leitfähigkeit	FR			BGK III. C2: 2006-09	5	µS/cm	2130	-	3830	-	829	-	838	-
Salzgehalt	FR			BGK III. C2: 2006-09	0.005	g/kg	11.2	-	20.2	-	4.38	-	4.42	-

Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (AS)

Parameter		Lab.	Akk.	Methode	Probenbezeichnung			Siebüberlauf Axpo V1			Siebüberlauf Kompost V1			Rindenmulch V1			Gerstenabgang V1		
					BG	Einheit		anl	wf		anl	wf		anl	wf		anl	wf	
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (OS)																			
Calcium (Ca)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	5.8	-	4.9	-	4.2	-	-	0.9				
Eisen (Fe)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	0.9	-	0.7	-	0.1	-	-	0.5				
Kalium (K)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	1.8	-	2.3	-	0.7	-	-	2.8				
Magnesium (Mg)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	0.9	-	0.4	-	0.3	-	-	0.6				
Natrium (Na)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	0.4	-	0.3	-	< 0.1	-	-	0.1				
Phosphor (P)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	0.5	-	0.2	-	0.1	-	-	1.5				
Schwefel	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	< 0.1	-	< 0.1	-	< 0.1	-	-	0.2				
Silicium (Si)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	10.8	-	9.9	-	0.8	-	-	4.4				

Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1				Gerstenabgang V1			
Probenbezeichnung				Siebüberlauf Axpo V1				Siebüberlauf Kompost V1				Rindenmulch V1							

Erläuterungen

BG - Bestimmungsgrenze

anl - Anlieferungszustand

wf - wasserfreier Zustand

Lab. - Kürzel des durchführenden Labors

Akk. - Akkreditierungskürzel des Prüflabors

Kommentare zu Ergebnissen

¹⁾ nicht berechenbar, da alle Werte < BG.

Die mit FR gekennzeichneten Parameter wurden von der Eurofins Umwelt Ost GmbH (Bobritzsch-Hilbersdorf) analysiert. Die Bestimmung der mit RE000FY gekennzeichneten Parameter ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAKS D-PL-14081-01-00 akkreditiert.

Die mit SND2 gekennzeichneten Parameter wurden von der Ruhr Lab GmbH (Gelsenkirchen) analysiert.

/f - Die Analyse des Parameters erfolgte in Fremdvergabe.

Eurofins Umwelt Ost GmbH - Lindenstraße 11
Gewerbegebiet Freiberg Ost - D-09627 - Bobritzsch-Hilbersdorf

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Hochschule für Technik
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
Klosterzelgstrasse 2
5210 Windisch
SCHWEIZ

Titel: Prüfbericht zu Auftrag 12117805
Prüfberichtsnummer: AR-21-FR-018156-01

Auftragsbezeichnung: PyroChar Analyse Probe 8

Anzahl Proben: 1
Probenart: Pflanzenkohle
Probenahmedatum: 07.05.2021
Probenehmer: Auftraggeber

Probeneingangsdatum: 18.05.2021
Prüfzeitraum: 18.05.2021 - 07.06.2021

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfgegenstände. Sofern die Probenahme nicht durch unser Labor oder in unserem Auftrag erfolgte, wird hierfür keine Gewähr übernommen. Die Ergebnisse beziehen sich in diesem Fall auf die Proben im Anlieferungszustand. Dieser Prüfbericht enthält eine qualifizierte elektronische Signatur und darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen in jedem Einzelfall der Genehmigung der EUROFINS UMWELT.

Es gelten die Allgemeinen Verkaufsbedingungen (AVB), sofern nicht andere Regelungen vereinbart sind. Die aktuellen AVB können Sie unter <http://www.eurofins.de/umwelt/avb.aspx> einsehen.

Das beauftragte Prüflaboratorium ist durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage (D-PL-14081-01-00) aufgeführten Umfang.

Dr. Sabine Bandemer
Prüfleitung
Tel. +49 37312076608

Digital signiert, 09.06.2021
Dr. Sabine Bandemer
Prüfleitung



Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	Vergleichswerte				Probenbezeichnung		Kleie V1		
				EBC-Feed Klasse I	EBC-AgroBio Klasse II	EBC-Agro Klasse III	EBC-Material Klasse IV	BG	Einheit	anl	wf	Probenahmedatum/ -zeit
				Probennummer								121059631
Eigenschaften der Pflanzenkohle												
spezifische Oberfläche (BET)	SND2/f		DIN ISO 9277						m²/g	-		195.65
Gesamtwassergehalt	FR	RE000 FY	DIN 51718: 2002-06					0.1	Ma.-%	2.0		-
Aschegehalt (550°C)	FR	RE000 FY	DIN 51719: 1997-07					0.1	Ma.-%	25.0		25.5
Kohlenstoff	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07					0.2	Ma.-%	66.8		68.1
Kohlenstoff, organisch	FR	RE000 FY	berechnet						Ma.-%	66.3		67.6
Wasserstoff	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07					0.1	Ma.-%	0.9		0.9
Stickstoff, gesamt	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07					0.05	Ma.-%	3.37		3.43
Schwefel, gesamt	FR	RE000 FY	DIN 51724-3: 2012-07					0.03	Ma.-%	0.09		0.10
Sauerstoff	FR	RE000 FY	DIN 51733: 2016-04						Ma.-%	3.0		3.1
TIC	FR	RE000 FY	DIN 51726: 2004-06					0.1	Ma.-%	0.5		0.5
Carbonate-CO2	FR	RE000 FY	DIN 51726: 2004-06					0.4	Ma.-%	1.7		1.8
H/C Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY	berechnet							0.17		0.17
H/Corg Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY	berechnet	< 0.7	< 0.7	< 0.7	< 0.7			0.17		0.17
O/C Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY	berechnet	< 0.4	< 0.4	< 0.4	< 0.4			0.034		0.034
pH in CaCl2	FR		DIN ISO 10390: 2005-12							11.1		-
Leitfähigkeit	FR		BGK III. C2: 2006-09					5	µS/cm	893		-
Salzgehalt	FR		BGK III. C2: 2006-09					0.005	g/kg	4.72		-

Probenbezeichnung										Kleie V1			
Probenahmedatum/ -zeit										07.05.2021			
Probennummer										121059631			
Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	Vergleichswerte				EBC-Ma-terial Klasse IV	BG	Einheit	anl	wf	
				EBC-Feed Klasse I	EBC-AgroBio Klasse II	EBC-Agro Klasse III							
Bestimmung aus dem Mikrowellendruckaufschluss nach DIN 2022-1: 2014-07													
Arsen (As)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01		13	13	15	0.8	mg/kg	-	< 0.8	
Blei (Pb)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01		45	150	250	2	mg/kg	-	< 2	
Cadmium (Cd)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01		0.7	1.5	5	0.2	mg/kg	-	< 0.2	
Kupfer (Cu)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	70	70	100	250	1	mg/kg	-	42	
Nickel (Ni)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	25	25	50	250	1	mg/kg	-	3	
Quecksilber (Hg)	FR		RE000 FY	DIN 22022-4: 2001-02		0.4	1	1	0.07	mg/kg	-	< 0.07	
Zink (Zn)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	200	200	400	750	1	mg/kg	-	313	
Chrom (Cr)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01	70	70	90	250	1	mg/kg	-	< 1	
Bor (B)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01					1	mg/kg	-	9	
Mangan (Mn)	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29): 2017-01					1	mg/kg	-	437	
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (AS)													
Calcium als CaO	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	Ma.-%	-	9.2	
Eisen als Fe2O3	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	Ma.-%	-	0.4	
Kalium als K2O	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	Ma.-%	-	25.7	
Magnesium als MgO	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	Ma.-%	-	13.1	
Natrium als Na2O	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	Ma.-%	-	< 0.1	
Phosphor als P2O5	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	Ma.-%	-	48.4	
Schwefel als SO3	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	Ma.-%	-	0.6	
Silicium als SiO2	FR		RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	Ma.-%	-	0.6	

Probenbezeichnung					Kleie V1							
Probenahmedatum/ -zeit					07.05.2021							
Probennummer					121059631							
Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	Vergleichswerte				BG	Einheit	anl	wf	
				EBC-Feed Klasse I	EBC-AgroBio Klasse II	EBC-Agro Klasse III	EBC-Material Klasse IV					
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (OS)												
Calcium als CaO	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	g/kg	-	23.6	
Eisen als Fe2O3	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	g/kg	-	0.9	
Kalium als K2O	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	g/kg	-	65.7	
Magnesium als MgO	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	g/kg	-	33.3	
Natrium als Na2O	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	g/kg	-	< 0.1	
Phosphor als P2O5	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	g/kg	-	123	
Schwefel als SO3	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	g/kg	-	1.4	
Silicium als SiO2	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09					0.1	g/kg	-	1.4	

Probenbezeichnung										Kleie V1	
Probenahmedatum/ -zeit										07.05.2021	
Probennummer										121059631	
Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	Vergleichswerte				BG	Einheit	anl	wf
				EBC-Feed Klasse I	EBC-AgroBio Klasse II	EBC-Agro Klasse III	EBC-Material Klasse IV				
Organ. Schadstoffe a. d. Toluolextrakt n. DIN EN 16181:2019-08(Extrakt.-verf. 2)											
Naphthalin	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	3.2
Acenaphthylen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	0.1
Acenaphthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	0.2
Fluoren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Phenanthren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	0.2
Anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[a]anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Chrysen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[b]fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[k]fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[a]pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Indeno[1,2,3-cd]pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Dibenzo[a,h]anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Benzo[ghi]perylen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08					0.1	mg/kg	-	< 0.1
Summe 16 EPA-PAK exkl. BG	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	4	4	6	30		mg/kg	-	3.7

Erläuterungen

BG - Bestimmungsgrenze

anl - Anlieferungszustand

wf - wasserfreier Zustand

Lab. - Kürzel des durchführenden Labors

Akkr. - Akkreditierungskürzel des Prüflabors

Die mit FR gekennzeichneten Parameter wurden von der Eurofins Umwelt Ost GmbH (Bobritzsch-Hilbersdorf) analysiert. Die Bestimmung der mit RE000FY gekennzeichneten Parameter ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS D-PL-14081-01-00 akkreditiert.

Die mit SND2 gekennzeichneten Parameter wurden von der Ruhr Lab GmbH (Gelsenkirchen) analysiert.

/f - Die Analyse des Parameters erfolgte in Fremdvergabe.

Erläuterungen zu Vergleichswerten

Untersuchung nach Richtlinie für die nachhaltige Produktion von Pflanzenkohle - EBC, Version 9.3G – Stand 11.04.2021.

Ho,V / Hu,p: Brenn. bzw. Heizwert bei konstantem Volumen / Druck

AS: bezogen auf die Asche

OS: bezogen auf die Originalsubstanz

Bei der Darstellung von Grenz- bzw. Richtwerten im Prüfbericht handelt es sich ausschließlich um eine Serviceleistung der EUROFINS UMWELT. Eine rechtsverbindliche Zuordnung der Prüfberichtsergebnisse im Sinne der zitierten Regularien wird ausdrücklich ausgeschlossen. Diese liegt alleinig im Verantwortungsbereich des Auftraggebers. Die zitierten Grenz- und Richtwerte sind teilweise vereinfacht dargestellt und berücksichtigen nicht alle Kommentare, Nebenbestimmungen und/oder Ausnahmeregelungen des entsprechenden Regelwerkes.

Eurofins Umwelt Ost GmbH - Lindenstraße 11
Gewerbegebiet Freiberg Ost - D-09627 - Bobritzsch-Hilbersdorf

Fachhochschule Nordwestschweiz FHNW
Hochschule für Technik
Institut für Biomasse und Ressourceneffizienz
Klosterzelgstrasse 2
5210 Windisch
SCHWEIZ

Titel: Prüfbericht zu Auftrag 12138716

Prüfberichtsnummer: AR-21-FR-037659-01

Auftragsbezeichnung: PyroChar Analyse Proben 3, 4, 5, 6

Anzahl Proben: 4

Probenart: Pflanzenkohle

Probenahmedatum: 14.09.2021, 17.09.2021, 22.09.2021, 23.09.2021

Probenehmer: angeliefert vom Auftraggeber

Probeneingangsdatum: 07.10.2021

Prüfzeitraum: 07.10.2021 - 20.10.2021

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die untersuchten Prüfgegenstände. Sofern die Probenahme nicht durch unser Labor oder in unserem Auftrag erfolgte, wird hierfür keine Gewähr übernommen. Die Ergebnisse beziehen sich in diesem Fall auf die Proben im Anlieferungszustand. Dieser Prüfbericht enthält eine qualifizierte elektronische Signatur und darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Änderungen bedürfen in jedem Einzelfall der Genehmigung der EUROFINS UMWELT.

Es gelten die Allgemeinen Verkaufsbedingungen (AVB), sofern nicht andere Regelungen vereinbart sind. Die aktuellen AVB können Sie unter <http://www.eurofins.de/umwelt/avb.aspx> einsehen.

Das beauftragte Prüflaboratorium ist durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkkS akkreditiert. Die Akkreditierung gilt nur für den in der Urkundenanlage (D-PL-14081-01-00) aufgeführten Umfang.

Dr. Sabine Bandemer
Prüfleitung
Tel. +49 37312076608

Digital signiert, 21.10.2021
Annett Rietschel
Prüfleitung



Probenbezeichnung		Rindenmulch-Kohle-Pyreg		Weizenkleie-Kohle-Pyrofarm		Kaffeehäutchen-Kohle-Pyrofarm					
Probenahmedatum/ -zeit		14.09.2021		17.09.2021		22.09.2021					
Probennummer		121134690		121134691		121134692					
Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	BG	Einheit	anl	wf	anl	wf	anl	wf
Eigenschaften der Pflanzenkohle											
spezifische Oberfläche (BET)	SND2/f		DIN ISO 9277: 2014		m²/g	-	286.22	-	293.46	-	42.59
Gesamtwassergehalt	FR	RE000 FY	DIN 51718: 2002-06	0.1	Ma.-%	-	5.5	-	5.8	-	3.1
Aschegehalt (550°C)	FR	RE000 FY	DIN 51719: 1997-07	0.1	Ma.-%	-	18.9	-	24.0	-	23.4
Kohlenstoff gesamt	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.2	Ma.-%	-	69.7	-	64.9	-	70.9
Kohlenstoff, organisch	FR	RE000 FY	berechnet		Ma.-%	-	69.0	-	64.8	-	70.2
Wasserstoff	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.1	Ma.-%	-	1.7	-	1.0	-	1.6
Stickstoff, gesamt	FR	RE000 FY	DIN 51732: 2014-07	0.05	Ma.-%	-	0.91	-	2.74	-	2.53
Schwefel, gesamt	FR	RE000 FY	DIN 51724-3: 2012-07	0.03	Ma.-%	-	0.04	-	0.18	-	0.48
Sauerstoff	FR	RE000 FY	DIN 51733: 2016-04		Ma.-%	-	7.3	-	1.8	-	6.4
TIC	FR	RE000 FY	DIN 51726: 2004-06	0.1	Ma.-%	-	0.7	-	0.1	-	0.7
Carbonate-CO2	FR	RE000 FY	DIN 51726: 2004-06	0.4	Ma.-%	-	2.5	-	< 0.4	-	2.6
H/C Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY	berechnet			-	0.29	-	0.17	-	0.28
H/Corg Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY	berechnet			-	0.29	-	0.17	-	0.28
O/C Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY	berechnet			-	0.079	-	0.021	-	0.068
pH in CaCl2	FR		DIN ISO 10390: 2005-12			-	8.5	-	9.5	-	-
Leitfähigkeit	FR		BGK III. C2: 2006-09	5	µS/cm	-	1010	-	3240	-	-
Salzgehalt	FR		BGK III. C2: 2006-09	0.005	g/kg	-	5.33	-	17.1	-	-

Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	Bestimmung aus dem Mikrowellendruckaufschluss nach DIN 22022-1: 2014-07									
					BG	Einheit	Rindenmulch-Kohle-Pyreg		Weizenkleie-Kohle-Pyrofarm		Kaffeehütchen-Kohle-Pyrofarm			
Probenbezeichnung					Probenahmedatum/ -zeit		14.09.2021		17.09.2021		22.09.2021			
Probennummer					121134690		121134691		121134692					
					anl	wf	anl	wf	anl	wf	anl	wf		
Arsen (As)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	0.8	mg/kg	-	-	-	-	-	< 0.8		
Blei (Pb)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	2	mg/kg	-	-	-	-	-	< 2		
Cadmium (Cd)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	0.2	mg/kg	-	-	-	-	-	< 0.2		
Kupfer (Cu)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	-	-	-	-	55		
Nickel (Ni)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	-	-	-	-	10		
Quecksilber (Hg)	FR	RE000 FY		DIN 22022-4; 2001-02	0.07	mg/kg	-	-	-	-	-	< 0.07		
Zink (Zn)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	-	-	-	-	308		
Chrom (Cr)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	-	-	-	-	7		
Bor (B)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	-	-	-	-	8		
Mangan (Mn)	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	-	-	-	-	519		
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (AS)														
Calcium als CaO	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	-	-	-	2.9		
Eisen als Fe2O3	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	-	-	-	0.7		
Kalium als K2O	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	-	-	-	32.6		
Magnesium als MgO	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	-	-	-	14.7		
Natrium als Na2O	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	-	-	-	< 0.1		
Phosphor als P2O5	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	-	-	-	47.4		
Schwefel als SO3	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	-	-	-	0.2		
Silicium als SiO2	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	-	-	-	-	0.8		

Parameter	Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung		Rindenmulch-Kohle-Pyreg		Weizenkleie-Kohle-Pyrofarm		Kaffeehäutchen-Kohle-Pyrofarm	
				Probenahmedatum/ -zeit		14.09.2021		17.09.2021		22.09.2021	
				Probennummer		121134690		121134691		121134692	
				BG	Einheit		anl		anl		wf
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (OS)											
Calcium als CaO	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	-	-	-	-	56.8
Eisen als Fe2O3	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	-	-	-	-	1.9
Kalium als K2O	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	-	-	-	-	78.7
Magnesium als MgO	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	-	-	-	-	19.9
Natrium als Na2O	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	-	-	-	-	0.8
Phosphor als P2O5	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	-	-	-	-	5.4
Schwefel als SO3	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	-	-	-	-	11.5
Silicium als SiO2	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	-	-	-	-	5.5

Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung		Rindenmulch-Kohle-Pyreg		Weizenkleie-Kohle-Pyrofarm		Kaffeehütchen-Kohle-Pyrofarm				
Organ. Schadstoffe a. d. Toluolextrakt n. DIN EN 16181:2019-08(Extrakt.-verf. 2)			BG	Einheit				anl	wf	anl		22.09.2021			
Probenahmedatum/ -zeit		121134690													
Probennummer		121134691													
												121134692			
Naphthalin	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	5.3	-	-	2.8	-	-	0.7
Acenaphthylen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	0.1	-	-	0.3	-	-	< 0.1
Acenaphthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	0.2	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Fluoren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	0.3	-	-	0.3	-	-	< 0.1
Phenanthren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	0.5	-	-	0.7	-	-	0.2
Anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	0.2	-	-	0.2	-	-	< 0.1
Fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	0.2	-	-	0.1	-	-	< 0.1
Pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	0.2	-	-	0.1	-	-	< 0.1
Benzo[a]anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Chrysen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Benzo[b]fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Benzo[k]fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Benzo[a]pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Indeno[1,2,3-cd]pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Dibenzo[a,h]anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Benzo[ghi]perylen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1	-	-	< 0.1
Summe 16 EPA-PAK exkl. BG	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08		mg/kg	-	-	-	7.0	-	-	4.5	-	-	0.9
Sonstige Parameter															
Chrom VI	FR	JE02	DIN EN 15192: 2007-02	1	mg/kg TS	< 1	-	-	-	< 1	-	-	< 1	-	-

Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	BG	Einheit	Probenbezeichnung		Rindelmulch-Kohle-Pyrofarm
							Probenahmedatum/ -zeit		23.09.2021
							Probennummer		121134693
Eigenschaften der Pflanzenkohle									
spezifische Oberfläche (BET)	SND2/f			DIN ISO 9277: 2014		m²/g	-	-	320.23
Gesamtwassergehalt	FR	RE000 FY		DIN 51718: 2002-06	0.1	Ma.-%	-	2.2	-
Aschegehalt (550°C)	FR	RE000 FY		DIN 51719: 1997-07	0.1	Ma.-%	-	19.6	20.0
Kohlenstoff gesamt	FR	RE000 FY		DIN 51732: 2014-07	0.2	Ma.-%	-	74.0	75.6
Kohlenstoff, organisch	FR	RE000 FY		berechnet		Ma.-%	-	73.0	74.5
Wasserstoff	FR	RE000 FY		DIN 51732: 2014-07	0.1	Ma.-%	-	1.2	1.3
Stickstoff, gesamt	FR	RE000 FY		DIN 51732: 2014-07	0.05	Ma.-%	-	0.77	0.79
Schwefel, gesamt	FR	RE000 FY		DIN 51724-3: 2012-07	0.03	Ma.-%	-	0.06	0.06
Sauerstoff	FR	RE000 FY		DIN 51733: 2016-04		Ma.-%	-	6.7	6.9
TIC	FR	RE000 FY		DIN 51726: 2004-06	0.1	Ma.-%	-	1.0	1.1
Carbonate-CO2	FR	RE000 FY		DIN 51726: 2004-06	0.4	Ma.-%	-	3.8	3.9
H/C Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY		berechnet			-	0.20	0.20
H/Corg Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY		berechnet			-	0.20	0.20
O/C Verhältnis (molar)	FR	RE000 FY		berechnet			-	0.068	0.069
pH in CaCl2	FR			DIN ISO 10390: 2005-12			-	9.2	-
Leitfähigkeit	FR			BGK III. C2: 2006-09	5	µS/cm	-	1630	-
Salzgehalt	FR			BGK III. C2: 2006-09	0.005	g/kg	-	8.60	-

Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung			
Bestimmung aus dem Mikrowellendruckaufschluss nach DIN 22022-1: 2014-07					Probenahmedatum/ -zeit		Rindelmulch-Kohle-Pyrofarm	
					23.09.2021			
					Probennummer		121134693	
			BG	Einheit		anl	wf	
Arsen (As)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	0.8	mg/kg	-	1.0	
Blei (Pb)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	2	mg/kg	-	2	
Cadmium (Cd)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	0.2	mg/kg	-	< 0.2	
Kupfer (Cu)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	20	
Nickel (Ni)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	11	
Quecksilber (Hg)	FR	RE000 FY	DIN 22022-4; 2001-02	0.07	mg/kg	-	0.12	
Zink (Zn)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	229	
Chrom (Cr)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	16	
Bor (B)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	38	
Mangan (Mn)	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 17294-2 (E29); 2017-01	1	mg/kg	-	980	
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (AS)								
Calcium als CaO	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	37.4	
Eisen als Fe2O3	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	2.0	
Kalium als K2O	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	7.3	
Magnesium als MgO	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	2.9	
Natrium als Na2O	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	0.5	
Phosphor als P2O5	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	2.2	
Schwefel als SO3	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	0.7	
Silicium als SiO2	FR	RE000 FY	DIN EN ISO 11885 (E22); 2009-09	0.1	Ma.-%	-	20.2	

Parameter		Lab.	Akkr.	Methode	Probenbezeichnung		Rindermulch-Kohle-Pyrofarm	
Elemente a. d. Borataufschluss d. Asche 550°C nach DIN 51729-11: 1998-11 (OS)					Probenahmedatum/ -zeit		23.09.2021	
					Probennummer		121134693	
					BG	Einheit		anf
Calcium als CaO	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	74.9
Eisen als Fe2O3	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	4.1
Kalium als K2O	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	14.6
Magnesium als MgO	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	5.8
Natrium als Na2O	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	1.0
Phosphor als P2O5	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	4.4
Schwefel als SO3	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	1.5
Silicium als SiO2	FR	RE000 FY		DIN EN ISO 11885 (E22): 2009-09	0.1	g/kg	-	40.4

Parameter		Lab.	Akk.	Methode	Probenbezeichnung			
Organ. Schadstoffe a. d. Toluolextrakt n. DIN EN 16181:2019-08(Extrakt.-verf. 2)					Probenahmedatum/ -zeit		Rindelmulch-Kohle-Pyrofarm	
					23.09.2021			
					121134693			
		BG	Einheit	anl	wf			
Naphthalin	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.6	
Acenaphthylen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Acenaphthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Fluoren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Phenanthren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	0.1	
Anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Benzo[a]anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Chrysen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Benzo[b]fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Benzo[k]fluoranthen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Benzo[a]pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Indeno[1,2,3-cd]pyren	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Dibenzo[a,h]anthracen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Benzo[ghi]perylen	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08	0.1	mg/kg	-	< 0.1	
Summe 16 EPA-PAK exkl. BG	FR	RE000 FY	DIN EN 16181:2019-08		mg/kg	-	0.7	
Sonstige Parameter								
Chrom VI	FR	JE02	DIN EN 15192: 2007-02	1	mg/kg TS	< 1	-	

Erläuterungen

BG - Bestimmungsgrenze

anl - Anlieferungszustand

wf - wasserfreier Zustand

Lab. - Kürzel des durchführenden Labors

Akk. - Akkreditierungskürzel des Prüflabors

TS - Trockensubstanz

Die mit FR gekennzeichneten Parameter wurden von der Eurofins Umwelt Ost GmbH (Bobritzsch-Hilbersdorf) analysiert. Die Bestimmung der mit JE02 gekennzeichneten Parameter ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 D-PL-14081-01-00 akkreditiert. Die Bestimmung der mit RE000FY gekennzeichneten Parameter ist nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018 DAkKS D-PL-14081-01-00 akkreditiert.

Die mit SND2 gekennzeichneten Parameter wurden von der Ruhr Lab GmbH (Gelsenkirchen) analysiert.

/f - Die Analyse des Parameters erfolgte in Fremdvergabe.