

Gärprodukte zur Verbesserung der Stallhaltung und der Bodenstruktur
– ein integraler Ansatz

GÄRPRODUKTE

Zuwendungsempfänger: B3 Projektbetreuung GmbH, Max-Eyth-Allee, 101, 14469 Potsdam, Plöchl, Matthias, Geschäftsführer, +49 331 60149812, mp-b3@b3-bornim.de, www.b3-bornim.de/b3-projektbetreuung.

Projektkoordination: B3 Projektbetreuung GmbH, Max-Eyth-Allee, 101, 14469 Potsdam, Plöchl, Matthias, Geschäftsführer, +49 331 60149812, mp-b3@b3-bornim.de, www.b3-bornim.de/b3-projektbetreuung.

Mitglieder der Operationellen Gruppe und assoziierte Partner:
Landgut Hennickendorf GmbH, Frenzel, Jürgen
Agrargenossenschaft Tauche eG, Mesecke, Hannes
Agro-Glien GmbH, Otten, Stefan
Jüterboger Agrargenossenschaft eG, Schwanke, Mario
Prodana GmbH, Lepenica, Kemal
Frankenförder Forschungsgesellschaft mbH, Sparborth, Doreen
Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie eV, Hoffmann, Thomas

Projektlaufzeit: 13.12.2016 – 31.03.2023

Budget: 1.631.802,39 EURO

Datum: 31.08.2023

Autoren: M. Plöchl, S. Ebert, J. Frenzel, T. Hoffmann, H. Mesecke, M. Schultze, C. Terboven, J. Unruh



Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung in deutscher Sprache	1
2	Kurzfassung in englischer Sprache	1
3	Situation zu Projektbeginn	1
3.1	Ausgangssituation.....	1
3.2	Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens	2
4	Projektverlauf	3
5	Projektergebnisse	5
5.1	Ergebnisse	5
5.1.1	Herstellung von Pflanzenkohle aus Gärrest	5
5.1.2	Einbringung der Pflanzenkohle in den Tiefstreustall als Strohteilersatz.....	9
5.1.3	Einbringung der Pflanzenkohle in den Biogasprozess	13
5.1.4	Nutzung der Pflanzenkohle zur Verbesserung der Bodeneigenschaften	25
5.2	Diskussion der Ergebnisse	36
5.3	Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen.....	38
5.4	Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen	38
5.5	Nutzen der Ergebnisse für die Praxis	38
5.6	Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen ..	38
5.7	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen	38
6	Zusammenarbeit der operationellen Gruppe.....	39
7	Kommunikations- und Disseminationskonzept.....	39
8	Anhang	8-1
8.1	Verwendung der Zuwendung.....	8-1
8.2	Nutzung des Innovationsdienstleisters (IDL)	8-1
8.3	Nachweis der Veröffentlichungen	8-2
8.4	Textvorlagen für ein Praxisblatt	8-2
8.5	Stand Forschungsplan	8-3

Abkürzungsverzeichnis

a	Jahr	kW _{el}	Kilowatt elektrische Leistung
AGG	Agro Glien GmbH	L	Liter
AGT	Agrargenossenschaft Tauche eG	LELF	Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneueordnung des Landes Brandenburg
AGW	Agrar KG Wittbrietzen	LF	Leitfähigkeit
Belastung	Raumbelastung	LGH	Landgut Hennickendorf
BET	Bestimmung der Oberfläche nach Brunauer, Emmett und Teller	Max.	Maximum
BGA	Biogasanlage	Min.	Minimum
BHKW	Blockheizkraftwerk	MLUK	Ministerium für Landwirtschaft, Umwelt und Klimaschutz des Landes Brandenburg
CHNS	Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel	mRNA	Messenger Ribonukleinsäure
d	Tag	Mw	Mittelwert
DIN	Deutsches Institut für Normung	N	Stickstoff
DNA	Desoxyribonukleinsäure	N _{ges}	Gehalt an Gesamtstickstoff
DSMZ	Deutsche Sammlung für Mikroorganismen und Zellkulturen	NH ₄ -N	Gehalt an Ammonium berechnet als Stickstoff
dt	Dezitonne = 100 kg	OG	Operationelle Gruppe
EN	Europäische Norm	oTS,oTM	Gehalt an organischer Trockensubstanz/Trockenmasse
FFS	Gehalt an flüchtigen Fettsäuren	P	Phosphor
FM	Frischmasse	pH	pH-Wert
FNR	Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe	PK	Pflanzenkohle
GHG, THG	Treibhausgase	S	Schwefel
gKö	Gramm Körner	SPE	Spurenelemente
h	Stunde	Std.-Abw.	Standardabweichung
hPa	Hekto-Pascal	t	Tonne
HTC	Hydrothermale Carbonisierung	t _M	mittlere hydraulische Verweilzeit
HTK	Hühnertrockenkot	TS, TM	Gehalt an Trockensubstanz/ Trockenmasse
JAG	Jüterbogener Agrargenossenschaft eG	ZR	Zeitraum
K	Kalium		
KW	Kalenderwoche		

Tabellen und Abbildungsverzeichnis

Tabelle 1: Durchschnittlicher Trockensubstanzgehalt (TS), organischer TS-Gehalt (oTS), pH & Leitfähigkeit (LF) der Pflanzenkohle vom gesamten Projektzeitraum. Statistische Kennwerte: Standardabweichung (Std.-Abw.), Minimum- und Maximumwerte (Min./Max.).	5
Tabelle 2: Elementare Pflanzenkohlezusammensetzung Mittelwerte (\bar{x}) des gesamten Projektzeitraumes sowie deren Standardabweichung (Std.-Abw.) und Minimum- und Maximum-Werte (Min./Max.)	7
Tabelle 3: Innere Oberfläche (gesamt) und Porenvolumen von 2 Stallmistproben.	9
Tabelle 4: Tabelle zur berechneten Pflanzenkohlemenge (PK) in den Versuchsställen der LGH und AGT bei einem PK-Anteil von 5% im Stallmist.	10
Tabelle 5: Globales GHG-Potential verschiedener Pflanzenkohle-Stallmist-Mixturen bei durchschnittlichen Sommer- und Wintertemperaturen (Dauer = 14 d, n = 4). Emissionsmessungen von Kohlenstoffdioxid (CO ₂), Methan (CH ₄) und Lachgas (N ₂ O) erfolgten unter anaeroben Bedingungen. CO ₂ -Äquivalente (CO ₂ eq) berechnet.	11
Tabelle 6: Die Verteilung des Verschmutzungsscores der Tiere. Score 3 und 4 ist nicht auf den Einsatz der PK zurückzuführen.	12
Tabelle 7: Einstreu- und Entmistungsmengen einer Milchviehgruppe der AGT	13
Tabelle 8: Zusammensetzung der Reaktorabläufe während Phase 1	15
Tabelle 9: Zusammensetzung der Reaktorabläufe während Phase 2	15
Tabelle 10: Parameter der BGA des LGH und AGT	16
Tabelle 11: Parameter für die chemische Analytik	18
Tabelle 12: Zeiträume der Testphase, LGH	18
Tabelle 13: chemische Parameter der Eingangsstoffe und des Substrats (LGH)	19
Tabelle 14: Gehalt an Spurenelementen in Eingangsstoffen und Substrat in mg/kg (LGH)	19
Tabelle 15: Durchschnittlicher Gehalt an Spurenelementen (LGH)	20
Tabelle 16: Methanausbeuten während der Zeiträume I bis IV (LGH)	21
Tabelle 17: Methanausbeuten der BGA LGH (Zeitraum III, KW 11 bis 23)	21
Tabelle 18: Parameter der Suspensionen in Reaktor und Gärrestlager (LGH)	22
Tabelle 19: Parameter des Gärrests (LGH)	22
Tabelle 20: Essenzielle Spurenelemente im separierten Gärrest und der Pflanzenkohle (LGH)	22
Tabelle 21: chemische Parameter der Eingangsstoffe und des Substrats (AGT)	23
Tabelle 22: Gehalt an Spurenelementen in Eingangsstoffen und Substrat in mg/kg (AGT)	23
Tabelle 23: Durchschnittlicher Gehalt an Spurenelementen (AGT)	23
Tabelle 24: Methanausbeuten der BGA AGT (Zeitraum III, KW 11 bis 23)	24
Tabelle 25: Parameter der Suspensionen in Reaktor und Gärrestlager (AGT)	24
Tabelle 26: Parameter des Gärrests (AGT)	24
Tabelle 27: Essenzielle Spurenelemente im separierten Gärrest (AGT)	24

Tabelle 28: Ernteerträge der Probeflächen an den Standorten Dobbrikower Berge und Berkenbrücker Berge im Jahr 2021.	34
Abbildung 1: Herstellung von Briketts aus Gärrest-Holz-Mischungen zur testweisen Karbonisierung im CarbonTwister® (09/2017).....	5
Abbildung 2: Einfacher KonTiki, Entwurfszeichnung des KonTiki im Projekt, KonTiki im Betrieb.....	6
Abbildung 3: Carbon Twister® mit verbesserter Zündung und Brennraumabdeckung, sowie Zuführung und Entnahme, das fertige Produkt.....	6
Abbildung 4: Pflanzenkohlezusammensetzung CHNS-Werte für unterschiedliche Proben während des Projektzeitraumes. In den unterschiedlichen Grautönen sind jeweils die Versuchsjahre markiert; die gestrichelten vertikalen Linien kennzeichnen die kalendarischen Jahreszeiten, beginnend mit Winter.	7
Abbildung 5: Elementare Pflanzenkohlezusammensetzung für unterschiedliche Proben während des Projektzeitraumes. In den unterschiedlichen Grautönen sind jeweils die Versuchsjahre markiert; die gestrichelten vertikalen Linien kennzeichnen die kalendarischen Jahreszeiten, beginnend mit Winter.	8
Abbildung 6: Emissionen verschiedener Gase während der Pflanzenkohleproduktion im Carbon Twister®.	8
Abbildung 7: Innere Oberfläche [m ² /g] verschiedener Pflanzenkohlechargen durch BET-Messungen bestimmt. Aufteilung der Gesamtoberfläche und des Mikroporenoberflächenanteils der verschiedenen Chargen.	9
Abbildung 8: Porenvolumen [mg/L] verschiedener Pflanzenkohlechargen. Dargestellt ist das Porenvolumen gesamt (total) sowie das Porenvolumen, welches auf die Mikroporen entfällt.	9
Abbildung 9: Porenradien verschiedener Pflanzenkohlechargen [nm]	9
Abbildung 10: N, P, K-Werte [mg/kg TS] für separierten Gärrest, Pflanzenkohle & Stallmist der LGH für die gesamte Projektlaufzeit.	10
Abbildung 11: GHG Emissionsindex verschiedener PK-Stallmist-Mischungen (Versuchsdauer = 14 d, n = 4; Kontrolle ist äquivalent zu 100% Stallmist).....	11
Abbildung 12: PK vor und nach dem Einstreuen in die Kälberbuchten	12
Abbildung 13: Dabei konnten 105 Kälber (76%) in die Kategorie sauber (1) eingestuft werden. 21 Kälber (15%) waren mittelgradig (2) verschmutzt und 12 (9%) der Kälber wiesen einen höheren Verschmutzungsgrad (3) auf. Verschmutzt waren vor allem erkrankte Tiere.	12
Abbildung 14: Versuche zur Steigerung der Raumbelastung am ATB: Versuchsaufbau (links), Effekt steigender Raumbelastung auf Methanertrag. R1 und R2 sind die beiden Parallelproben mit PK, R3 und R4 sind die beiden Parallelproben ohne PK.....	14
Abbildung 15: Methanausbeute der vier Parallelversuche in Phase 1	15
Abbildung 16: Methanausbeute der vier Parallelversuche in Phase 2, mit deutlichem Einfluss der wechselnden Fütterung	15
Abbildung 17: Biogasanlage des LGH in Dobbrikow	16
Abbildung 18: Biogasanlage der AGT in Tauche	17

Abbildung 19: Methanausbeute (rot), Raumbelastung (B, grau) und Festmistanteil (grün) während der Testphase (LGH).....	20
Abbildung 20: Versuchsschema des Kressekeimtests DIN EN 16086-2.	25
Abbildung 21: Ergebnisse eines Kressekeimtests gedüngt/ ungedüngt mit unterschiedlichen Pflanzenkohlebeimengungen in Torf und Boden des LGH sowie der AGT.	26
Abbildung 22: Längenmessungen sowie relative Divergenz zur Kontrolle des Kressekeimtest nach DIN EN 16086-2 mit Pflanzenkohlebeimengung von 0, 5, 10, 15, 25, 50 und 100 % zu Torf.	26
Abbildung 23: Längenmessungen sowie relative Divergenz zur Kontrolle des Kressekeimtest nach DIN EN 16086-2 mit Pflanzenkohlebeimengung von 0, 5, 10, 15, 25, 50 und 100 % zu Boden des LGH.....	27
Abbildung 24: Längenmessungen sowie relative Divergenz zur Kontrolle des Kressekeimtest nach DIN EN 16086-2 mit Pflanzenkohlebeimengung von 0, 5, 10, 15, 25, 50 und 100 % zu Boden der AGT.....	27
Abbildung 25: Versuchsschema zu den hydroponischen Wachstumsversuchen mit unterschiedlichen Pflanzenkohlebeimengen. Der pflanzliche Modellorganismus <i>Arabidopsis thaliana</i> (Ökotyp Col-0) wurde für die bessere Untersuchbarkeit des Transkriptoms genutzt.	28
Abbildung 26: Pflanzenklimakammer zur Pflanzenanzucht (Fitotron HGC 1014 V; FA. Vötsch) – UV, Temperatur und Luftfeuchte regelbar.....	28
Abbildung 27: Schematische Darstellung der wichtigsten Schritte der Transkriptom- Analyse.....	29
Abbildung 28: Entwicklung von Wurzel- und Grünteil der Pflanzenkohlebehandlungen (0, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25 % Pflanzenkohle) an Versuchstag 13, 21 und 38.	29
Abbildung 29: Ernteertrag (Frisch- und Trockenmasse) von Wurzel- und Grünteil der verschiedenen pflanzenkohlebehandelten Hydroversuchsansätze.....	30
Abbildung 30: Durchschnittliche Wurzellängen [cm] von <i>A. thaliana</i> in Hydrokultur mit Zusatz von 0 (Kontrolle), 2,3, 5, 10, 15, 20 und 25 % PK an den Versuchstagen 13, 21 und 38. Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanz.....	30
Abbildung 31: Signifikante Genexpressionsausprägungen für die einzelnen PK-Anwendungen (Condition: 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 %PK) im Vergleich zur Kontrollvariante (0 %PK) im Grünteil von <i>A. thaliana</i> . Gezeigt sind höher (upregulated) und niedriger (downregulated) exprimierte „Gencluster“ der sogenannten „GO-Terms“ (https://geneontology.org).....	31
Abbildung 32: Signifikante Genexpressionsausprägungen für die einzelnen PK-Anwendungen (Condition: 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 %PK) im Vergleich zur Kontrollvariante (0 %PK) im Wurzelteil von <i>A. thaliana</i> . Gezeigt sind höher (upregulated) und niedriger (downregulated) exprimierte „Gencluster“ der sogenannten „GO-Terms“ (https://geneontology.org). Orange markiert sind GOs zum Wurzeltransportmechanismus.	31
Abbildung 33: Zusammenfassung der Genexpressionsanalysen; links: Grünteil, rechts: Wurzelteil. Die in den vorigen Abbildungen aufgeführten Gencluster wurden in Übergruppen sortiert: Pflanzenwachstum (Wachstum); Pflanzenabwehr (Abwehr) sowie Gencluster, welche während des Pflanzenwachstums und der Abwehr (Wachstum & Abwehr) exprimiert wurden.	31
Abbildung 34: Ernteerträge von Welschem-Weidelgras in 3 Erntezyklen unter Beimengung unterschiedlicher Pflanzenkohlemengen (2, 4, 6, 8 % und Kontrolle).....	32
Abbildung 35: Topfversuche mit Welschem-Weidelgras.....	32

Abbildung 36: Wasserhaltekapazität in [%] des Bodenvolumens (entnommen beim LGH) in Abhängigkeit der Pflanzenkohlemenge für unterschiedliche Saugspannungen (10, -50, -100 hPA) entsprechende der Bodentiefen 10, 50, 100 cm	33
Abbildung 37: Versuchsschema zu Wasserhaltekapazitätsbestimmung unterschiedlicher Boden-Pflanzenkohlemischungen nach DIN EN 13041.	33
Abbildung 38: Gehalte an P, K, Mg und Humus auf den Untersuchungsflächen des LGH. Ix sind die Proben von Elsholz, IIx sind die Proben von Berkenbrück und IIIx sind die Proben von Dobbrikow. Die Proben II13 und II14 sind von 02/2018, I7, I8, I9, II1, II2, II3, III4, III5, III6 sind von 05/19, alle anderen Proben sind von 09/22.....	35

1 Kurzfassung in deutscher Sprache

Die Pyrolyse von separiertem festem Gärrest führt zu einer Pflanzenkohle (PK), die sowohl als Einstreu in Rinderställen als auch zur Verbesserung der Bodeneigenschaften von Äckern und zur Stabilisierung der Biogasproduktion geeignet ist. Die Einstreu der PK im Stall ersetzt teilweise Stroh, führt zur Verbesserung der Stallluft, des Tierwohls, verlängert den Zeitraum bis zur nächsten Entmistung und reduziert die Emission von Treibhausgasen. Im Biogasreaktor werden durch die Pflanzenkohle Spurenelemente angereichert und Mikroorganismen länger im Prozess gehalten. In Laborversuchen verbesserte die PK die Wasserhaltefähigkeit des Bodens und das Wachstum der Pflanzen. In den Feldversuchen konnten aufgrund der sehr trockenen Witterung während des Projektzeitraums diese Effekte bisher nur eingeschränkt nachgewiesen werden. Die Pyrolyse erfolgte mit einem Carbon Twister®, weiterentwickelt auf dem KonTiki-Prinzip und in der Lage, 100 % Gärrest zu verarbeiten.

2 Kurzfassung in englischer Sprache

Pyrolysis of separated solid digestate leads to a biochar (BC) that is suitable as bedding in cattle stalls as well as for improving the soil properties of fields and stabilising biogas production. The BC bedding in the stable partially replaces straw, leads to improvement of stable air, animal welfare, extends the period until the next manure removal and reduces the emission of greenhouse gases. In the biogas reactor, the plant carbon enriches trace elements and keeps microorganisms in the process longer. In laboratory tests, the BC improved the water retention capacity of the soil and the growth of the plants. In the field trials, due to the very dry weather during the project period, these effects could only be demonstrated to a limited extent so far. Pyrolysis was carried out with a Carbon Twister®, further developed on the KonTiki principle and capable of processing 100 % digestate.

3 Situation zu Projektbeginn

3.1 Ausgangssituation

In weiten Teilen Brandenburgs wird Landwirtschaft auf nährstoffarmen Böden unter trockenen klimatischen Verhältnissen betrieben. Extrem heterogene Schläge mit großen Teilflächen mit niedrigen Erträgen kennzeichnen die in diesem Projekt teilnehmenden landwirtschaftlichen Betriebe. Die nachhaltige Verbesserung der Bodenstruktur in Kombination mit ressourcenschonenden Bearbeitungsmethoden und der Nutzung bzw. Veredlung von betriebseigenem Wirtschaftsdüngern ist ein wichtiger Beitrag für eine konkurrenzfähige Landwirtschaft. Ein spezifisches Problem Rinder haltender Betriebe ist der teils hohe und teure Bedarf an Stroh (ca. 320 €/Kuh/Jahr) als Einstreu in Tiefmistställen.

Nach Angaben des MLUL gelten aufgrund der großen Heterogenität der Ackerböden, der ungünstigen Witterungsbedingungen und der generell niedrigen durchschnittlichen Ackerzahl (33,8) 75 % der landwirtschaftlichen Flächen in Brandenburg als benachteiligt. Daher wird erwartet, dass das Projektziel auf viele Mischbetriebe (Anzahl der Viehhaltungsbetriebe und Mischbetriebe: ca. 3000) in Brandenburg übertragbar ist (siehe Agrarbericht 2015, LELF).

In Brandenburg werden gegenwärtig ca. 500 Biogasanlagen betrieben, die landwirtschaftliche Einsatzstoffe verarbeiten (Fachverband Biogas). Die Anforderungen an Biogasanlagen zur

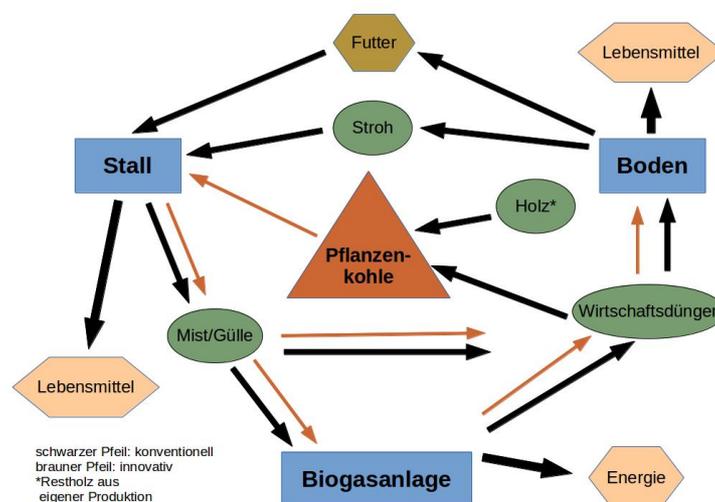
Lagerung der Gärreste wurden und werden ständig den Bedürfnissen zu einem verbesserten Umweltschutz angepasst. Dem gesteigerten Bedarf an Lagerkapazität kann durch Separation und weiterer Aufarbeitung der festen Gärreste zu Pflanzenkohle begegnet werden.

3.2 Aufgabenstellung und Ziele des Vorhabens

Ziel des Projekts war es, eine alternative Einstreuvariante für Rinderställe mithilfe von Pflanzenkohle zu entwickeln, die Stroh teilweise ersetzt und dabei die Tiergesundheit fördert. Diese Pflanzenkohle wird durch Pyrolyse von separierten festen Gärresten aus der Biogasanlage hergestellt. Neben der Anwendung im Stall wird die Pflanzenkohle zusätzlich mit Mist oder Gärrest gemischt. Der so aufgewertete Wirtschaftsdünger soll positive Effekte auf die Bodenfruchtbarkeit haben und zu Ertragssteigerungen beitragen. Wird der mit PK versetzte Mist als Einsatzstoff für die Biogasanlage genutzt, verbessert sich die Prozessstabilität der Anlage und eventuell wird die Biogasausbeute erhöht. Dieser integrale Ansatz soll nachhaltig zur Produktivität des Gesamtbetriebes beitragen.

Dieses Projekt war eines der ersten und wenigen, die die bis dahin gewonnenen Ergebnisse in eine große Fläche unter realen Bedingungen der Landwirtschaft übertragen.

In der nebenstehenden Abbildung sind die Kompartimente Stall, Biogasanlage, Feld sowie die Produkte dieser Kompartimente und der Weg des Wirtschaftsdüngers mit und ohne Pflanzenkohlebeimischung dargestellt. Dieser Kreislauf beschreibt auch die Prozesskette und die Systemgrenzen des Projekts.



Für die Herstellung der Pflanzenkohle entschieden wir uns für die Pyrolyse, da diese gegenüber der Hydrothermalen Carbonisierung (HTC) deutliche Vorteile hat. So ist keine Nachbehandlung der Pyrolyse-Pflanzenkohle notwendig – der Kohle-Produktionsprozess kann im KonTiki so gesteuert werden, dass mögliche toxische Stoffe (wie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe), im Unterschied zur HTC, nicht gebildet werden.

Neben der Entscheidung für das grundsätzliche Verfahren der Karbonisierung von Gärresten musste auch eine Entscheidung für die Technik der Karbonisierung getroffen werden. Außer der favorisierten Anlage KonTiki stand die Anlage der Fa. Pyreg GmbH als praxistauglich zur Diskussion. Neben der einfachen Skalierbarkeit der KonTiki, eine Erweiterung um mehrere Einheiten ist ohne große Umbauten möglich, sprechen für das KonTiki-System die deutlich niedrigeren Investitionen (200.000 € vs. 500.000 €) und die niedrigeren Betriebskosten, die in einem Pflanzenkohlepreis von ca. 220 €/t für den KonTiki im Vergleich zu 440 €/t für die Pyreg-Anlage resultieren sollten (eigene Berechnungen).

4 Projektverlauf

Jahr	Tätigkeit	Partner
2017	Intensive Versuche im Labormaßstab zur Aufbereitung von Gärrest und Holzhackschnitzeln und der anschließenden Pyrolyse	ATB und Prodana
2017/2018	Weitreichende Umplanung der Pyrolyseanlage, z.B. Verzicht auf Brikettierung bzw. Pelletierung des Gärrests, Zündung des Gärrests an vielen Stellen durch sternförmiges Röhrengestänge und heiße Luft	Prodana
2017/2018	Suche nach Möglichkeiten der Finanzierung der Pyrolyseanlage, Förderung durch verschiedene Agrarförderprogramme nicht möglich, Beginn 2018 mit der Hausbank eine Kreditlinie vereinbart	B3PB
2017	Holzhackschnitzel aus Heckenpflege hergestellt	AGW
2017	Aufnahme der Betriebsparameter der BGA Wittbrietzen	B3PB
2017	Verlagerung der Projektarbeit von Wittbrietzen nach Dobbrikow	AGW →LGH
2018	Erfassung der Aufwandmengen für Stroheinstreu und Analyse des Mists in den Kälberställen und den Ställen der Mastbullenhaltung des LGH, Daten der Biogasanlage in Dobbrikow erfasst und ausgewertet	LGH, ATB, B3PB
2019	Aufbau 1. Prototyp des KonTiki in Dobbrikow (Februar) und Inbetriebnahme (März)	Prodana, LGH
2019-2022	Regelmäßige Analysen Mist aus Bullenställen LGH und Milchviehställen AGT	ATB, AGT, LGH
2019	Laborversuche mit Mist von AGT mit PK-Beimischung zu Emissionen von Treibhausgasen, Laborversuche Biogasbildung stickstoffreicher Einsatzstoffe unter PK-Einfluss	ATB, B3PB
2019	erste Feldversuche mit PK auf einem Mais-Schlag, aufgrund hoher Trockenheit im Sommer schlechte Ernte, Erträge auf den unterschiedlich gedüngten Streifen konnte nicht erfasst werden	LGH
2019-2022	Regelmäßige Erfassung und Bewertung der Leistung und Betriebsparameter der Biogasanlagen in Dobbrikow und Tauche und Analyse der Zusammensetzung der Fermenterinhalt	B3PB, LGH, AGT, ATB
2020	Einbringung von PK in Kälberställe des LGH, in insgesamt 6 Terminen auf Verschmutzung, Fress- und Liegeverhalten sowie auf Auswirkungen auf die Verdauung begutachtet	LGH, FFG
2020	Kressekeimtests mit Torf und Sand unter Einfluss von PK-Beimengungen	ATB
2020	Ersatz KonTiki durch Carbon Twister®, Corona-bedingt im Frühjahr und Sommer Lieferengpässen, dadurch Verzögerung in der Fertigstellung des neuen Prototypen, Herstellung von	Prodana, LGH

	Pflanzkohle vom Frühjahr bis Herbst sehr stark eingeschränkt und Praxisversuche nur in sehr geringem Umfang möglich	
2020/2021	Wiederherstellung und Aufbau der beiden alten KonTiki bei AGT und JAG, Inbetriebnahme bei JAG im April 2021 durch Liefer-schwierigkeiten für Ersatzteile und bei AGT im Oktober 2021 wegen Genehmigungsproblemen	Prodana, B3PB, AGT, JAG
2021	LGH auf 3 Schlägen Feldversuche mit jeweils PK, PK und Separat und Kontrolle, Ernten im Juli (Roggen), September (Sonnenblume) und im Oktober (Mais), Roggen mit Labor-drescher aufgearbeitet und ausgewertet, Sonnenblume und Mais ungenügende Erntemenge	LGH
2021	Kressekeimtests mit originalem Ackerboden aus Dobbrikow und Tauche unter Einfluss von PK-Beimengungen	ATB
2021	Rücktransport KonTiki zu LGH, da Betrieb bei JAG wegen Problemen bei Stromanschluss und der Vortrocknung des Materials nicht möglich war, Beginn des Umbaus des KonTiki	JAG, B3PB, Prodana
2021	LGH begann PK in einem Bullenstall einzustreuen damit begann auch der Eintrag der PK in die Biogasanlage	LGH
2021/2022	AGT über drei Entmistungsperioden Aufwandmengen an Stroh und behandeltem Gärrest als Zusatz sowie die Menge des Mists bei der Entmistung erfasst.	AGT
2021	Produktion von PK bei AGT eingeschränkt, da Material zu feucht, weiterer Umbau des KonTiki bei AGT um Material vorzutrocknen	Prodana, AGT
2022	Fortsetzung der Feldversuche auf 3 Schlägen bei LGH mit Roggen und Mais	LGH
2022	Produktion von PK bei LGH für AGT Stallversuche	LGH, AGT
2022	Bonitierung von 2 Milchviehgruppen der AGT	FFG, AGT
2022	Versuche zur Keimung und zum Pflanzenwachstum von <i>Arabidopsis thaliana</i> unter PK-Einfluss, Einfluss von PK-Beimengungen auf das Wachstum von Weidelgras in Topfversuchen	ATB
2023	Abschlussveranstaltung, 16 Projektmitarbeiter und 20 externe Teilnehmer, Ort: Heimvolkshochschule Seddiner See, Dauer: 9:30 bis 16:00, Vorträge zu Projektergebnissen und zu einzelnen Themenblöcken durch externe Experten, intensive Diskussion der Ergebnisse und deren Implikation für die Landwirtschaft	Alle

5 Projektergebnisse

5.1 Ergebnisse

5.1.1 Herstellung von Pflanzenkohle aus Gärrest

Zu Beginn des Projekts stand die Optimierung der Einsatzstoffe für die Pyrolyse im Vordergrund. Es wurden Brikettversuche mit extrudiertem Holz und Gärresten in unterschiedlichen Mischungsverhältnissen durchgeführt (Abbildung 1). Dabei wurde erkannt, dass die Brikettierung sowie die Beimischung von Holz überflüssig ist und die Pflanzenkohleherstellung mit 100 % separierten Gärresten erfolgen kann.



Abbildung 1: Herstellung von Briketts aus Gärrest-Holz-Mischungen zur testweisen Karbonisierung im CarbonTwister® (09/2017).

Die Pflanzenkohle wurde über den Projektzeitraum laufend am ATB auf TS, oTS, pH, LF, CHNS, elementare Zusammensetzung (Tabelle 1; Abbildung 4; Abbildung 5) analysiert. Es wurden Untersuchungen zur Partikelcharakterisierung in Form von Dichtebestimmung und Partikelgrößenverteilung sowie BET-Messungen (Abbildung 7; Abbildung 8; Abbildung 9) durchgeführt. Die Kurvenverläufe der bedeutendsten Emissionsgase bei der Pflanzenkohleproduktion verdeutlichen, dass es sich bei dem Karbonisierungsprozess im CarbonTwister® um eine echte Pyrolysereaktion handelt (Abbildung 6).

Tabelle 1: Durchschnittlicher Trockensubstanzgehalt (TS), organischer TS-Gehalt (oTS), pH & Leitfähigkeit (LF) der Pflanzenkohle vom gesamten Projektzeitraum. Statistische Kennwerte: Standardabweichung (Std.-Abw.), Minimum- und Maximumwerte (Min./Max.).

Parameter	Mittelwert	Std.-Abw.	Min.	Max.
TS ₁₀₅ [% FM]	41,97	8,08	29,66	59,36
oTS [%TS]	59,18	12,90	39,58	80,22
pH-Wert	9,35	0,29	8,76	9,80
LF [mS/cm]	11,72	9,72	3,00	32,70

Die Pyrolyseanlage wurde bereits vor der ersten Inbetriebnahme erheblich weiterentwickelt (Abbildung 2). Durch die Anpassungen, insbesondere der Anordnung und Steuerung der Zündpunkte in der Füllung konnte der Anteil von Gärprodukt in der Mischung von den

ursprünglich geplanten 30 % auf 60 % gesteigert werden. Mit der Weiterentwicklung des KonTiki hin zum CarbonTwister® (Abbildung 3) wurde der Brennraum abgedeckt und die Gutzuführung über ein Band ermöglicht. Außerdem erfolgte das Ablöschen nicht mehr im Brennraum, sondern in einer Auffangwanne, aus der die abgelöschte Pflanzenkohle über ein weiteres Band entnommen wird. In Versuchen mit Gärresten des LGH und externen Betrieben konnte nachgewiesen werden, dass der Einsatz von 100 % Gärprodukt möglich ist, und eine hochwertige Pflanzenkohle entsteht. Die in der Anlage produzierte Pflanzenkohle aus Gärrest erfüllt alle EBC-Standards. Insbesondere die organischen Schadstoffe liegen unter den Grenzwerten. Lediglich im Bereich der Schwermetalle kann es bei stark Zink-belasteten Einsatzstoffen zur Überschreitung des Grenzwerts für EBC-Futter und EBC-AgroBio kommen.

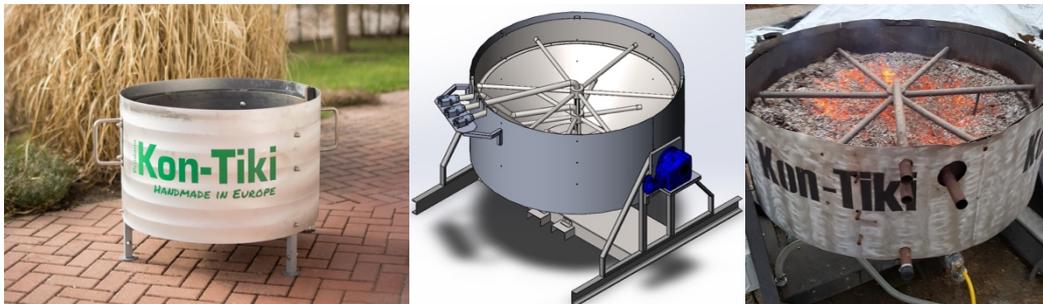


Abbildung 2: Einfacher KonTiki, Entwurfszeichnung des KonTiki im Projekt, KonTiki im Betrieb

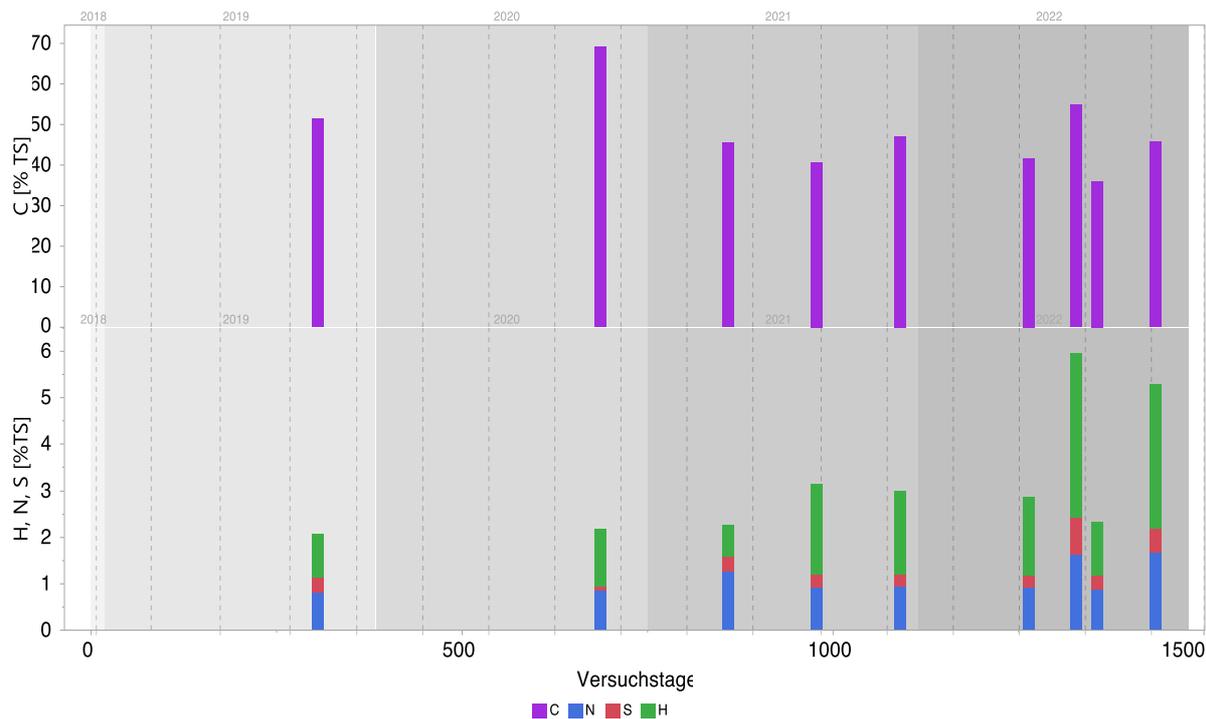
Zur Verbesserung der Emissionseigenschaften (Messungen durch ATB und in Zusammenarbeit mit der Uni Erlangen) wurde der Deckel wärmeisoliert und der Schornstein verlängert. Die Messungen ergaben weiterhin, dass eine Trocknung des Materials auf max. 25 % Feuchte entscheidender ist als die Art und Zusammensetzung des Materials.



Abbildung 3: Carbon Twister® mit verbesserter Zündung und Brennraumabdeckung, sowie Zuführung und Entnahme, das fertige Produkt

In der weiteren Entwicklung wurde der Carbon Twister® so erweitert, dass das Material für die Zugabe in einen Vorlagebehälter gegeben wird, wo es auch vorgetrocknet werden kann. Für die Entnahme des pyrolysierten Materials wurde ein Auffangbehälter konstruiert, in dem Material nach dem Ablöschen abtropfen und zwischenlagern kann. Außerdem wurde die Wärmespeicherung mit einem Wasserreservoir vorbereitet. Der Wärmetauscher nimmt hierzu die Abwärme aus der Abluft auf und gibt diese an das Wasserreservoir ab. Die Steuerung des Carbon Twister® wurde weiter verbessert, so dass nach dem Beladen der Vorlage der Prozess mit einem Knopfdruck gestartet werden kann. Mit einem weiteren Knopfdruck kann dann in die

eigentliche Pyrolysephase gewechselt werden. Noch muss jedoch der Prozess durch eine Person überwacht werden, um das Ende des Prozesses festzustellen und die Entladung der Brennkammer zu starten. Weiterhin wurde eine Fernbeobachtung und Aufzeichnung der Brennparameter eingerichtet. Es wurden systematische Dauerläufe mit Variation der Prozessparameter und zur Definition eines Muster-Verbrennungszyklus durchgeführt.



	\bar{x}	Std.-Abw.	Min.	Max.
	mg/kg _{TS}			
Al	380,67	240,81	85,41	832,26
B	7,86	3,62	2,91	17,11
Ba	12,62	6,57	5,63	32,45
Ca	5565,61	2834,60	1970,90	12933,06
Cd	0,07	0,03	0,01	0,16
Co	0,32	0,14	0,08	0,71
Cr	158,39	762,67	1,02	4316,17
Cu	7,75	3,80	1,95	18,34
Fe	817,87	402,82	115,66	1915,62
K	3317,60	1687,18	855,24	8745,62
Mg	1376,16	1045,60	340,50	5051,74
Mn	99,50	53,89	32,47	231,51
Mo	0,79	0,96	0,08	4,14
Na	394,96	407,99	33,22	1787,02
Ni	1,53	1,28	0,34	5,75
P	1649,95	904,59	262,82	3723,52
Pb	1,47	0,97	0,21	3,71
S	529,42	239,13	65,30	1115,51
Se
Ti	9,69	7,42	0,68	26,58
V	7,29	18,18	0,28	83,15
W	0,25	0,11	0,09	0,47
Zn	31,66	12,32	7,70	52,75

Abbildung 4: Pflanzenkohlezusammensetzung CHNS-Werte für unterschiedliche Proben während des Projektzeitraumes. In den unterschiedlichen Grautönen sind jeweils die Versuchsjahre markiert; die gestrichelten vertikalen Linien kennzeichnen die kalendarischen Jahreszeiten, beginnend mit Winter.

Tabelle 2: Elementare Pflanzenkohlezusammensetzung Mittelwerte (\bar{x}) des gesamten Projektzeitraumes sowie deren Standardabweichung (Std.-Abw.) und Minimum- und Maximum-Werte (Min./Max.)

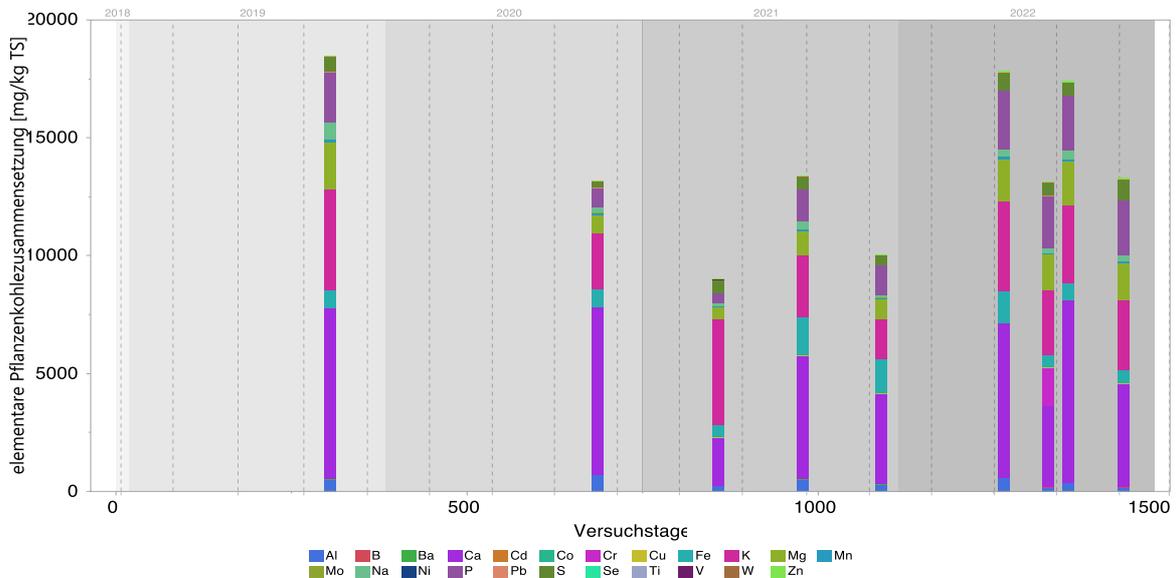


Abbildung 5: Elementare Pflanzenkohlezusammensetzung für unterschiedliche Proben während des Projektzeitraumes. In den unterschiedlichen Grautönen sind jeweils die Versuchsjahre markiert; die gestrichelten vertikalen Linien kennzeichnen die kalendarischen Jahreszeiten, beginnend mit Winter.

Es ergaben sich die folgenden grundsätzlichen Parameter:

- Produktionszeit für eine Beladung ca. 2,2 m³ dauert 2 - 3 h (je nach Material)
- aus ca. 2,2 m³ Rohmaterial (Gärrest) entstehen 500 - 600 L Pflanzenkohle
- bei 3 Durchgängen am Tag eine Gesamtmenge von 1,5 – 1,8 m³/d PK
- TM bei frischer Pflanzenkohle ca. 33 % - Gehalt H₂O ca. 67 %
- nach Lagerung von ca. 4 d TM ca. 50 % - Gehalt H₂O ca. 50 %
- Oberfläche PK 313 m²/g, im Vergleich Oberfläche Aktivkohle = 600 – 700 m²/g
- Feststoffdichte Pflanzenkohle 1740 kg/m³
- Schüttdichte Pflanzenkohle 369 kg/m³ bei 67 % H₂O
- Schüttdichte Pflanzenkohle 125 kg/m³ trocken bzw. 150 kg/m³ bei TM 80 %
- Die PK behält die Strukturmerkmale des Ausgangsmaterial, d.h. es ist deutlich zu erkennen, welcher Gärrest oder welches Holz für die Pyrolyse verwendet wird

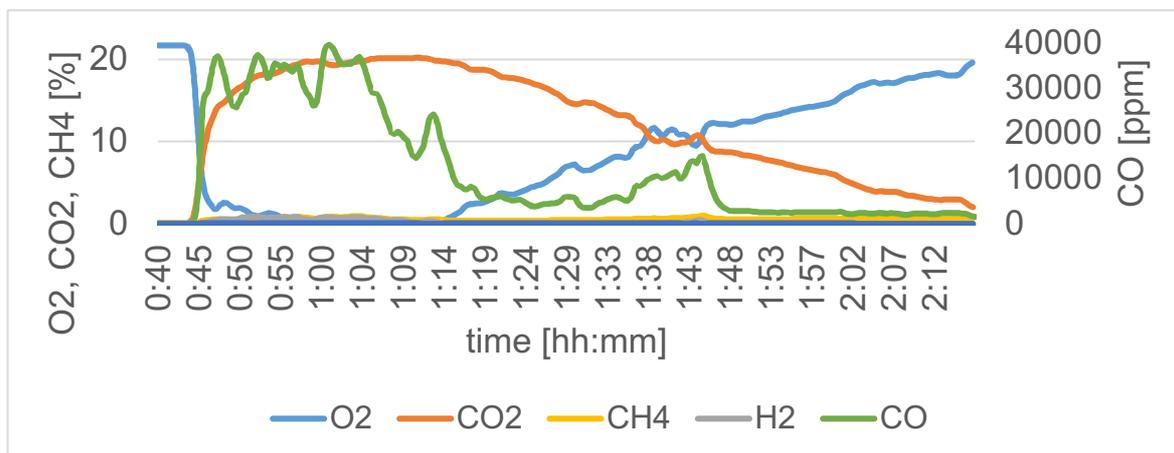


Abbildung 6: Emissionen verschiedener Gase während der Pflanzenkohleproduktion im Carbon Twister®.

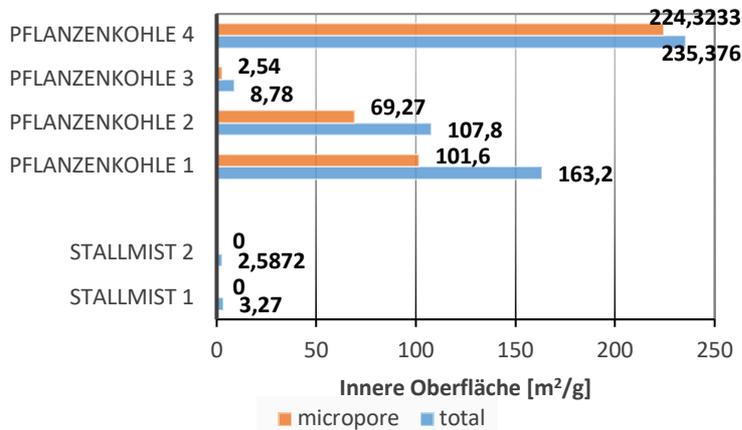


Abbildung 7: Innere Oberfläche [m²/g] verschiedener Pflanzenkohlechargen durch BET-Messungen bestimmt. Aufteilung der Gesamtoberfläche und des Mikroporenflächenanteils der verschiedenen Chargen.

Abbildung 8: Porenvolumen [mL/L] verschiedener Pflanzenkohlechargen. Dargestellt ist das Porenvolumen gesamt (total) sowie das Porenvolumen, welches auf die Mikroporen entfällt.

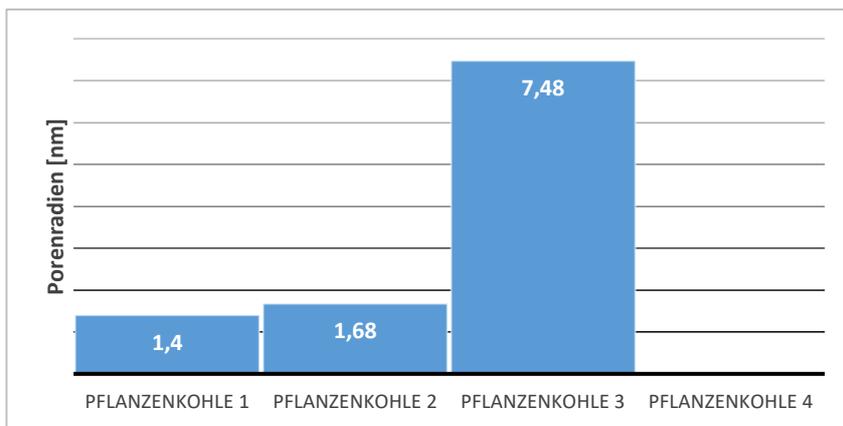
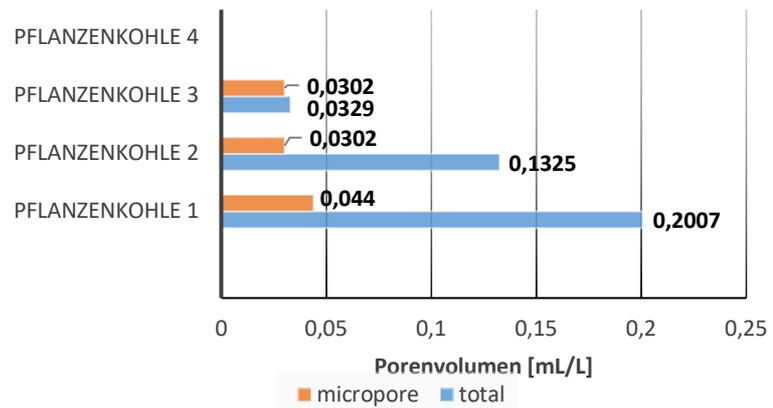


Abbildung 9: Porenradien verschiedener Pflanzenkohlechargen [nm]

5.1.2 Einbringung der Pflanzenkohle in den Tiefstreustall als Strohteilersatz

Für die Einbringung der Pflanzenkohle in den Tiefstreustall wurden bei dem LGH Chargen von Pflanzenkohle aus 70 % Gärrest und 30 % Holzhackschnitzel im Carbon Twister® hergestellt. Die Zusammensetzung der Kreislaufsubstrate Stallmist, separierte Gärreste, sowie der Pflanzenkohle wurden regelmäßig auf die 3 wichtigsten Makronährelemente analysiert (Abbildung 10). Ergänzend wurden Werte zur Oberflächen- und Porenvolumen des Stallmistes aus der LGH (Tabelle 3) bestimmt.

Tabelle 3: Innere Oberfläche (gesamt) und Porenvolumen von 2 Stallmistproben.

	Oberfläche [m²/g]	Porenvolumen [mL/g]
Stallmist 1	3,27	0,024
Stallmist 2	2,59	-

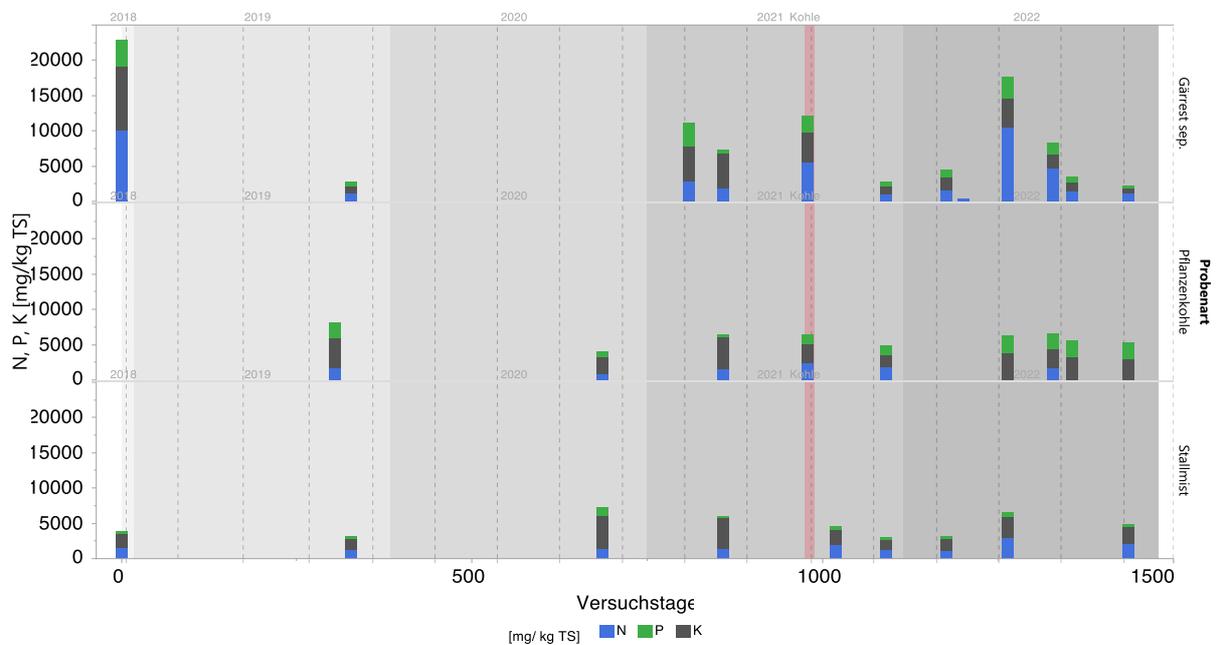


Abbildung 10: N, P, K-Werte [mg/kg TS] für separierten Gärrest, Pflanzenkohle & Stallmist der LGH für die gesamte Projektlaufzeit.

Um die benötigte Pflanzenkohlemenge zur Ausbringung im Tiefstreustall berechnen zu können, wurde aus eigenen Überlegungen kombiniert mit Literaturrecherche folgende Formel entwickelt:

Ziel: PK-Anteil im Stallmist mindestens 5 %

$$m_{PK} = \frac{m_{Festmist}}{Stall \cdot t_{EN}} * PKAnteil[\%]$$

mit

$$\frac{m_{Festmist}}{Stall \cdot t_{EN}} = \frac{m_{Festmist}}{Kuh \cdot t_{EN}} * n$$

$$\frac{m_{Festmist}}{Kuh \cdot t_{EN}} = \frac{m_{Festmist}}{Kuh \cdot Monat} * t_{EN}$$

m Masse [dt/Stall]
n Zahl der Tiere pro Stall [Kopf/Stall]
t_{EN} Entmistungsintervall [d_{end} - d_{anf}] [Tage]

Dies ergab folgende Mengen auszubringende Pflanzenkohle je Entmistungsintervall für den LGH und die AGT:

Tabelle 4: Tabelle zur berechneten Pflanzenkohlemenge (PK) in den Versuchsställen der LGH und AGT bei einem PK-Anteil von 5% im Stallmist.

		LGH Stall 1	AGT Gruppe 40
spezifisch für jeweiligen Agrarbetrieb	Entmistungsintervall [Tage]	28	21
	n _{Tiere} [Kopf/Stall]	20	50
Tabelle (VLK*)	Festmist/(Kuh * Monat) [dt/(Kopf 30Tage)]	10	10
Berechnung	Festmist/(Stall * Entmistungsintervall) [dt/(Stall Tage)]	186,67	350
	Einsatzmenge PK [dt]	9,33	17,5

*KTBL Schrift 502 (2014) Festmist- und Jaucheanfall, Mengen und Nährstoffgehalte aus Bilanzierungsmodellen, Autoren: Rutzmoser, K., Horlacher, D., Schultheiß, U.; www.landwirtschaftskammern.de/pdf/quelledaten-rinder.pdf

Messungen zum Verbleib der eingebrachten Pflanzenkohle im Stall waren auf Grund von flächenmäßig ungleicher Verteilung der Pflanzenkohle im Stall (bedingt durch die Ausbringungspraxis – kontinuierliches, portionsweises, oberflächliches Ausstreuen der Pflanzenkohle innerhalb eines Entmistungsintervalls) und das ungleichmäßige Einarbeiten dieser in den Stallmist durch das zufällige Eintreten durch die Rinder, nicht möglich. Die erste Pflanzenkohleausbringung im Kälberstall des LGH erfolgte im März 2020, im Stall 1 des LGH in KW 28 2021. Um den Vorgang der Ausbringung so effizient wie möglich zu gestalten, wurde auf eine Größenseparation der Kohlepartikel verzichtet und die Pflanzenkohle im Zustand, wie sie nach Produktion vorlag, in den Stall eingebracht.

T [°C]	Pflanzenkohle [%] [% TS]	CO ₂		CH ₄		N ₂ O		Σ CO ₂ -eq [kg C ₀₂ -eq/ t FM]
		MW [kg/ t FM _{Stallmist}]		MW [kg/ t FM _{Stallmist}]	CO ₂ -eq [kg CO ₂ -eq/ t FM]	MW [kg/ t FM _{Stallmist}]	CO ₂ -eq [kg CO ₂ -eq/ t FM]	
23,5	0	5,33		2,63	65,78	6,93E-06	2,06E-03	71,11
	5	6,41		2,41	60,30	7,31E-06	2,18E-03	66,71
	25	5,31		2,19	54,87	6,06E-06	1,81E-03	60,18
	50	5,15		2,31	57,82	6,23E-06	1,86E-03	62,97
13	0	0,77		0,32	7,98	8,87E-07	2,64E-04	8,75
	5	1,41		0,30	7,50	1,06E-06	3,15E-04	8,91
	25	0,63		0,34	8,59	7,13E-07	2,13E-04	9,22
	50	0,42		0,21	5,22	3,98E-07	1,19E-04	5,64

Tabelle 5: Globales GHG-Potential verschiedener Pflanzenkohle-Stallmist-Mixturen bei durchschnittlichen Sommer- und Wintertemperaturen (Dauer = 14 d, n = 4). Emissionsmessungen von Kohlenstoffdioxid (CO₂), Methan (CH₄) und Lachgas (N₂O) erfolgten unter anaeroben Bedingungen. CO₂-Äquivalente (CO₂eq) berechnet.

Die Wirkung der Pflanzenkohle auf das Stallklima wurde durch die Anfertigung einer Masterarbeit am ATB mit dem Titel „Einfluss gärrestbasierter Pyrolysekohle auf Emissionen von Rinderfestmist“ mit Hilfe von anaeroben Laborinkubationsversuchen bei durchschnittlichen Sommer- und Wintertemperaturen (23,5 & 13 °C) durchgeführt. Dazu wurde Rinderfestmist der AGT (Gruppe 40) mit unterschiedlichen Mengen an Pflanzenkohle (0, 5, 25, 50 %) versetzt. Diese Untersuchungen ergaben, dass die Spurengas-Emission des reinen Festmists an sich schon temperaturabhängig ist. Die Beimengung von Pflanzenkohle führt zur Reduktion der Spurengasemissionen – die beste Wirkung erzielte bei Sommertemperaturen dabei die 25 %-Variante (Tabelle 5, Abbildung 11).

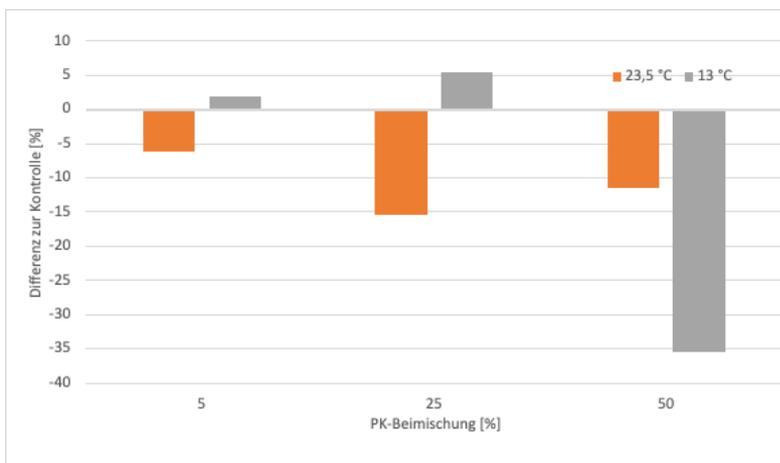


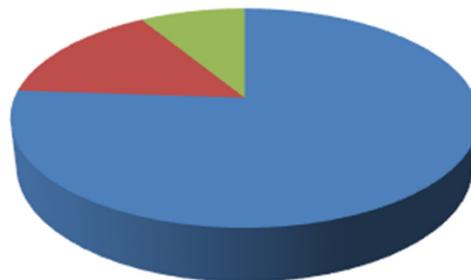
Abbildung 11: GHG Emissionsindex verschiedener PK-Stallmist-Mischungen (Versuchsdauer = 14 d, n = 4; Kontrolle ist äquivalent zu 100% Stallmist).

Die Auswirkung der PK-Beimischung auf die Kälber und Junginder wurde im Jahr 2020 an insgesamt 6 Termin in 3 Stallabteilen des LGH beurteilt. Pro Tier standen ca. 6,5 m² Platz zur Verfügung und somit deutlich mehr als nach Tierschutz-Nutztierhalteverordnung gefordert. Die Kälber erhielten unterschiedliche Milchaustauschertränken in unterschiedlichen Mengen und Konzentrationen. Weiterhin kamen Heu ad libitum und Tränkwasser ebenfalls ad libitum zum Einsatz. Eingestreut wurde 2x pro Woche ca. 50 kg Stroh. Wöchentlich wurden 2-mal ca. 35 L PK eingestreut. Diese Menge ist im Stroh deutlich zu erkennen.



Abbildung 12: PK vor und nach dem Einstreuen in die Kälberbuchten

Hinsichtlich der untersuchten und anhand der Parameter, Fress-Liege-Laufverhalten, Body Condition-Score, und Hygienescore beleuchteten Hilfsgrößen zur Tiergesundheit können keine negativen Auswirkungen des Einsatzes der Aktivkohlen im Bereich der Kälberaufzucht bzw. der Jungbullenhaltung festgestellt werden. Die Kälber verschmutzten nicht originär an der Pflanzenkohle und waren überwiegend sauber (Abbildung 13). Der Hygienescore kann als hoch eingestuft werden.



■ 1 sauber ■ 2 mittelgradig verschmutzt ■ 3 hochgradig verschmutzt

Abbildung 13: Dabei konnten 105 Kälber (76%) in die Kategorie sauber (1) eingestuft werden. 21 Kälber (15%) waren mittelgradig (2) verschmutzt und 12 (9%) der Kälber wiesen einen höheren Verschmutzungsgrad (3) auf. Verschmutzt waren vor allem erkrankte Tiere.

Im Bereich der Jungbullen werden pro 20 Tiere und Woche 500 kg Stroh eingestreut. Mit der ersten Einstreu wurden 210 L PK eingebracht und dann jeweils weitere 70 L pro Tag.

Tabelle 6: Die Verteilung des Verschmutzungsscores der Tiere. Score 3 und 4 ist nicht auf den Einsatz der PK zurückzuführen.

Score	Anzahl	Anteil
Score 1 (sauber)	18 Tiere	41 %
Score 2 (geringgradig verschmutzt)	14 Tiere	32 %
Score 3 (mittelgradig verschmutzt)	6 Tiere	13 %
Score 4 (hochgradig verschmutzt)	6 Tiere	11 %

Vom Oktober 2021 bis Februar 2022 wurde bei der AGT die Mengen eingebrachten Stroh und behandeltem Gärrests in einer Gruppe mit 50 Milchkühen erfasst. Durch die günstigen Witterungsbedingungen in der ersten Periode verweilten die Tiere häufig im Freilauf und die Entmistungsperiode dauerte 143 Tage. Die beiden weiteren Perioden dauerten 73 bzw. 58 Tage. Zu Beginn einer Periode wurden jeweils 39,2 t behandelte Gärreste eingestreut, darauf kommen dann 2- oder 3-mal jeweils 6 Strohhollen. Im weiteren Fortgang werden im Abstand von 6 bis 14 Tagen 5 oder 6 Strohhollen und 10 bis 15 t Gärrest. Die insgesamt eingebrachten Mengen sind in Tabelle 7 zusammengefasst. In der Variante mit PK-Einstreu wird der Gärrest durch 25 – 30 m³ Pflanzenkohle ersetzt.

Tabelle 7: Einstreu- und Entmistungsmengen einer Milchviehgruppe der AGT

Zeitraum	Stroh	Gärreste	Festmist
14.05.21 – 04.10.21	31,5 t	109,7 t	178,7 t
04.10. 21 – 16.12.21	31,5 t	99,7 t	168,7 t
16.12.21 – 12.02.22	27,0 t	78,2 t	134,2 t

Im Milchvieh-Tiefmiststall der AGT wurden im Herbst 2022 der Zustand der Kühe erfasst. Das Tierwohl der Milchkühe der PK-Einstreugruppe (50 Tiere) und der Kontrollgruppe (2*25 Tiere) wurde zuerst durch augenscheinliche Erfassung des Sauberkeitsscores und der Milchanalyse vor dem Eintrag von Pflanzenkohle im Stall beobachtet und eingeordnet. Die Tiere sind überwiegend geringgradig verschmutzt bis sauber, nur wenige Tiere sind mittelgradig und nur einzelne hochgradig verschmutzt. Die Euterbewertung ist immer gegenüber der Körperbewertung zu besseren Werten verschoben. Im März 2023 wurde dann bei einer Gruppe entsprechend der Berechnung in Tabelle 4 PK eingestreut.

Die tägliche Einstreu der PK sollte vorrangig in den feuchten Stellen, wie z.B. dem Tränkebereich erfolgen. Ein Teil der PK wird gefressen, vor allem solche, die beim Einstreuen in den Futterbereich fällt. Der subjektive Eindruck der mit den Tieren befassten Mitarbeitern ist:

- die Stallluft ist angenehmer
- die Tiere bleiben gesünder, fühlen sich wohler
- bessere Leistungsparameter
- höhere Verschmutzung der Tiere tritt nicht ein, Feuchtbereiche weniger stark ausgebildet
- Entmistungsspanne kann verlängert werden

Insbesondere der letzte Punkt führt zu einer deutlichen Kostenreduktion, so kann bei dem LGH die Entmistungsspanne von 4 auf 5 Wochen verlängert werden. Außerdem ersetzen 350 L PK 500 kg Stroh.

5.1.3 Einbringung der Pflanzenkohle in den Biogasprozess

5.1.3.1 PK im Biogasprozess in Laborversuchen

Versuche zur Einbringung von Pflanzenkohle in den Biogasprozess (Sánchez et al., 2021) zeigten, dass gärrestbasierte Pflanzenkohle in 6 L-Anaerobreaktoren bei Versuchen zur Steigerung der Raumbelastung eine systempuffernde Wirkung besitzen, was verglichen zu den Kontrollreaktoren zu höheren Methanerträgen führte (Abbildung 14).

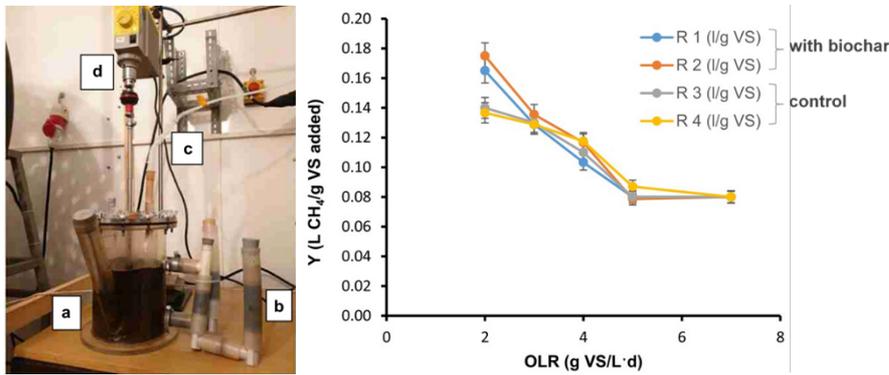


Abbildung 14: Versuche zur Steigerung der Raumbelastung am ATB: Versuchsaufbau (links), Effekt steigender Raumbelastung auf Methanertrag. R1 und R2 sind die beiden Parallelproben mit PK, R3 und R4 sind die beiden Parallelproben ohne PK.

In vier weiteren, parallel stattfindenden, quasikontinuierlichen Laborversuchen wurde die Auswirkung von PK auf die Biogasproduktion von stickstoffreichen Einsatzstoffen (Schweinegülle und Hühner trockenkot (HTK)) über einen Zeitraum von 14 Monaten untersucht. Neben einem Behälter ohne PK-Zugabe (Kontrolle) gab es zwei Behälter mit unterschiedlichen PK aus Gärrest (PK1 und PK2) und einem Behälter mit Zugabe von Holzkohle (HK). Das Arbeitsvolumen betrug 13 L. Die erste Versuchsreihe dauerte von Dezember 2020 bis April 2021. Hier wurde konstant gefüttert und täglich eine feste Menge PK zugegeben:

1. Kontrolle, tägliche Fütterung mit 34 g HTK und 166 g Schweinegülle
2. PK1, tägliche Fütterung wie Kontrolle + 13,3 g_{FM} PK1/Woche
3. PK2, tägliche Fütterung wie Kontrolle + 12,2 g_{FM} PK2/Woche
4. HK, tägliche Fütterung wie Kontrolle + 14,4 g_{FM} HK/Woche

In der zweiten Versuchsreihe von April 2021 bis Januar 2022 wurde mit wechselnden Mengen gefüttert und die PK wurde bereits in der Futtermischung eingebracht:

1. Kontrolle, tägliche Fütterung mit Futtermischung 17 % HTK und 83 % Schweinegülle
2. PK1, tägliche Fütterung mit Futtermischung 17 % HTK und 83 % Schweinegülle + 15,5 g PK1/kg Futtermischung
3. PK2, tägliche Fütterung mit Futtermischung 17 % HTK und 83 % Schweinegülle + 22 g PK2/kg Futtermischung
4. HK, tägliche Fütterung mit Futtermischung 17 % HTK und 83 % Schweinegülle + 24 g HK/kg Futtermischung

Die direkte Zugabe von PK1 und PK2 in den Fermenter führte zu besseren Ausbeuten und stabilerem Prozessverlauf als bei der Zugabe in die Futtermischung. Bei der HK scheint die Zugabe zur Futtermischung vorteilhafter zu sein. Vermutlich war hierfür eine leichtere Trennung zwischen Flüssigphase und der HK möglich, die oft aufschwimmt und stückiger ist als die Pflanzenkohlen. Beide untersuchten PK haben offensichtlich ein viel höheres Potential Flüssigkeit aufzunehmen, quellen auf und schweben in der Futterlösung, somit wird immer etwas Kohle mit in den Reaktor gefüttert. Es gab einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden PKs. Während Phase 1 zeigte PK2 eine bessere Wirkung als PK1 und in Phase 2 war dieser Effekt noch deutlicher (Abbildung 15, Abbildung 16).

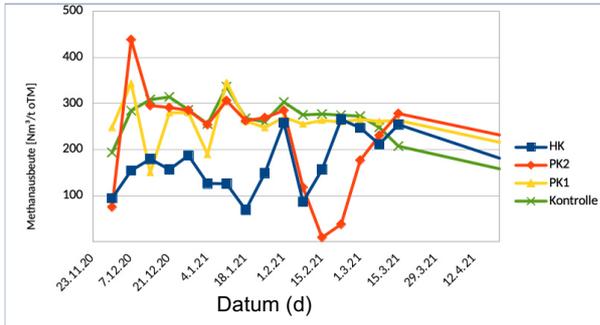


Abbildung 15: Methanausbeute der vier Parallelversuche in Phase 1

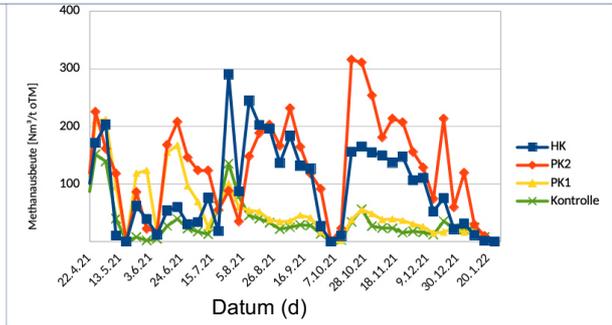


Abbildung 16: Methanausbeute der vier Parallelversuche in Phase 2, mit deutlichem Einfluss der wechselnden Fütterung

Tabelle 8: Zusammensetzung der Reaktorabläufe während Phase 1

Datum	Kontrolle					
	pH	TM	OTM	Nges	NH4-N P	S
	g/kg FM					
17.12.20	8,4	38	20,6	5,8	3,45	0,132
28.12.20	8,4	43	25,5	4,99	3,11	0,288
29.01.21	8,3	34	19,82	3,57	2,79	0,187
05.02.21						
12.02.21	8,3	38	21,96	3,95	3,4	0,092
19.02.21						
26.02.21	8,5	16	7,28	3,41	3,22	0,045
05.03.21	8,4	16	7,79	3,66	3,5	0,051
12.03.21	8,4	14	6,82	3,65	3,5	0,043

Datum	PK1					
	pH	TM	OTM	Nges	NH4-N P	S
	g/kg FM					
17.12.20	8,6	41	21,89	5,08	3,76	0,135
28.12.20	8,4	40	23,88	3,78	3,14	0,267
29.01.21	8,4	40	23,88	3,78	3,14	0,267
05.02.21	8,3	17	7,85	2,91	2,75	0,056
12.02.21	8,4	15	6,83	2,93	2,76	0,053
19.02.21	8,3	15	7,46	2,93	2,84	0,048
26.02.21	8,6	16	7,26	2,93	2,77	0,049
05.03.21	8,7	18	8,96	3,04	2,81	0,05
12.03.21	8,5	18	8,57	3,13	3,01	0,056

Datum	PK2					
	pH	TM	OTM	Nges	NH4-N P	S
	g/kg FM					
17.12.20	8,5	31	17,21	5,35	3,27	0,1
28.12.20	8,8	46	28,2	3,84	2,92	0,295
29.01.21	8,8	17	7,97	2,62	2,31	0,041
05.02.21						
12.02.21						
19.02.21						
26.02.21	8,6	18	8,39	3,31	3,26	0,05
05.03.21	8,6	18	8,57	3,53	3,33	0,049
12.03.21	8,5	9	4,28	3,49	3,38	0,024

Datum	HK					
	pH	TM	OTM	Nges	NH4-N P	S
	g/kg FM					
17.12.20	8,6	44	25,39	4,95	3,66	0,128
28.12.20	8,6	37	22,98	3,56	3,1	0,204
29.01.21						
05.02.21						
12.02.21						
19.02.21						
26.02.21	8,6	19	9,29	3,48	3,15	0,067
05.03.21	8,6	17	8,04	3,45	3,2	0,05
12.03.21	8,7	17	8,35	3,09	3,09	0,055

Tabelle 9: Zusammensetzung der Reaktorabläufe während Phase 2

Datum	Kontrolle					
	pH	TM	OTM	Nges	NH4-N P	S
	g/kg FM					
07.06.21	7,8	21,0	13,5	2,10	1,44	0,026
10.08.21	8,7	17,0	8,8	4,18	3,66	0,048
16.09.21	8,4	28,0	16,1	4,54	4,03	0,137
11.10.21	8,3	24,0	12,6	4,56	4,03	0,108
11.10.21	8,3	30,0	16,7	4,50	3,93	0,136
12.11.21	8,5	36,0	21,6	4,46	4,14	0,199
15.12.21	8,6	36,0	21,3	5,00	4,25	0,212
15.02.22	8,7	36	21,6	4,82	4,25	0,229

Datum	PK1					
	pH	TM	OTM	Nges	NH4-N P	S
	g/kg FM					
07.06.21	7,8	21,0	13,5	2,10	1,44	0,026
10.08.21	8,6	18,0	9,77	3,69	3,40	0,042
16.09.21	8,4	30,0	17,6	4,98	4,14	0,179
11.10.21	8,3	27,0	14,4	4,67	4,24	0,133
11.10.21	8,3	33,0	19,6	4,75	4,13	0,161
12.11.21	8,5	33,0	19,3	4,72	4,19	0,151
15.12.21	8,5	32,0	18,5	5,09	4,35	0,150
15.02.22	8,6	44,0	27,8	5,19	3,95	0,233

Datum	PK2					
	pH	TM	OTM	Nges	NH4-N P	S
	g/kg FM					
07.06.21	7,8	21,0	13,5	2,100	1,441	0,026
10.08.21	8,1	17,0	8,6	3,540	3,660	0,041
16.09.21	8,5	32,0	18,3	4,768	4,224	0,175
11.10.21	8,1	27,0	14,1	5,049	4,428	0,131
11.10.21	8,0	32,0	18,4	4,768	4,256	0,149
12.11.21	8,3	50,0	31,8	4,940	4,530	0,306
15.12.21	8,2	39,0	23,2	4,875	4,524	0,205
15.02.22	8,6	48,0	30,3	4,896	4,219	0,278

Datum	HK					
	pH	TM	OTM	Nges	NH4-N P	S
	g/kg FM					
07.06.21	7,8	21,0	13,5	2,10	1,44	0,026
10.08.21						
16.09.21	8,2	41,0	25,4	4,84	4,10	0,270
11.10.21	8,1	24,0	12,5	4,39	4,06	0,101
11.10.21	8,1	34,0	20,2	4,73	4,15	0,183
12.11.21	8,3	33,0	19,5	4,88	4,22	0,169
15.12.21	8,3	29,0	16,1	4,41	4,26	0,136
15.02.22	8,9	42,0	26,2	4,62	3,80	0,217

Insgesamt zeigte sich keine Auswirkung auf den Stickstoff- und Ammoniumgehalt. Jedoch gab es eine deutliche Akkumulation von Schwefel, Phosphor und den meisten Spurenelementen sowohl bei PK-Zugabe zum Reaktor als auch zur Futtermischung (Tabelle 8). Die Kohle sollte vor Zugabe mit Spurenelementen beladen werden. PK aus Gärrest scheint gut geeignet zu sein, falls erhöhte Schwefel- und/oder Phosphorgehalte in den Einsatzstoffen vorliegen.

5.1.3.2 PK in der Biogasanlage

5.1.3.2.1 Beschreibung der Biogasanlagen des LGH und der AGT

Die BGA des LGH verfügt über eine Bemessungsleistung von 223 kW_{el} und eine installierte Leistung von 446 kW_{el} (Tabelle 10). Die Anlage besteht aus einem Reaktor und einem Gärrestlager (Abbildung 17). Beide Behälter sind mit Foliendächern zur Speicherung des Biogases ausgerüstet. Der Gärrest des Reaktors wird mit einem Schneckenseparator aufbereitet, wobei die Fasern als fester Gärrest abgetrennt werden. Die flüssige Phase wird im Gärrestlager gesammelt und steht als Dünger für Getreide- und Maispflanzen auf dem Acker bereit. Für die Strom- und Wärmeerzeugung werden zwei BHKW genutzt. Der elektrische Wirkungsgrad der BHKW wird mit 42,5 % (Tedom-Schnell, 2021) angesetzt. Die Biogasbildung findet bei mesophilen Temperaturen (Richtwert LGH: 42°C) statt. Der Schwefelwasserstoffgehalt im Biogas wird durch Zugabe von Eisenhydroxidpulver in den Reaktor (LGH) reduziert. Die LGH verwendet für die Separation des Gärrestes den Schneckenseparator Stallkamp PSS 4-550, der die Gärreste auf TS-Gehalte bis zu 30 % entwässert (Stallkamp, 2022).

Tabelle 10: Parameter der BGA des LGH und AGT

	LGH	AGT
Bemessungsleistung	223 kW _{el}	223 kW _{el}
Installierte Leistung	446 kW _{el}	446 kW _{el}
Inbetriebnahme	2016	2016
Reaktor	3.002 m ³ netto	3.885 m ³ netto
Gärrestlager	4.988 m ³ netto	5.484 m ³ netto
Gaslager	2.464 m ³	2.041 m ³
Hersteller	Consentis	Sauter Biogas GmbH

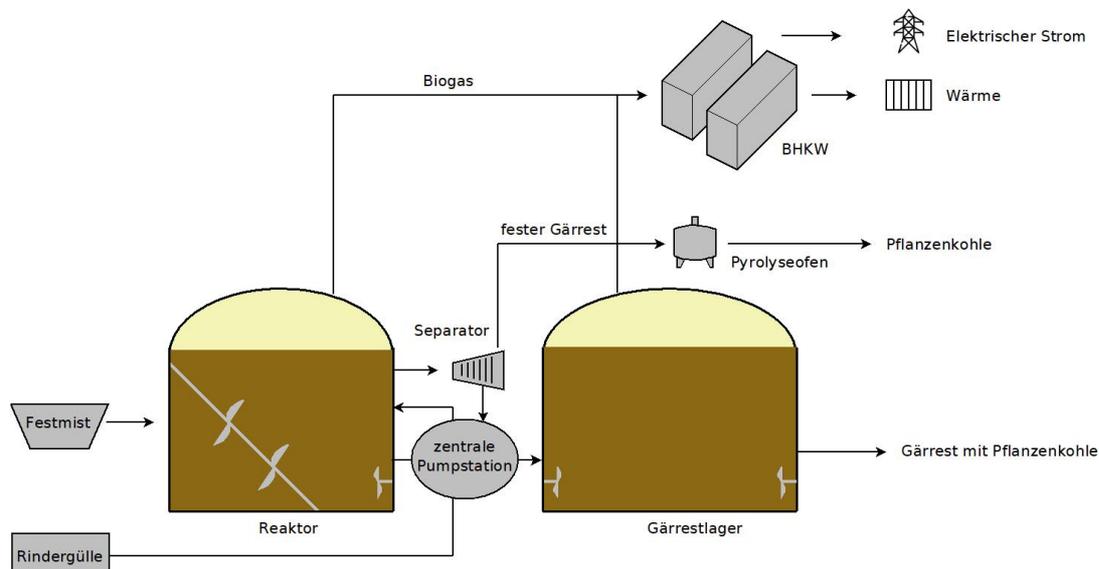


Abbildung 17: Biogasanlage des LGH in Dobbrikow

Das LGH setzt den Rinderfestmist aus den Ställen der Bullenmast als Eingangsstoff für die BGA ein. Gülle, die täglich angefahren wird, wird als weiterer Einsatzstoff genutzt. Zudem dosiert das LGH eine handelsübliche Spurenelementlösung in den Reaktor.

Die installierte Leistung der BGA der AGT beträgt 446 kW_{el} mit einer Bemessungsleistung von 223 kW_{el}. Die Anlage besteht aus einem Reaktor und einem nicht abgedeckten Gärrestlager (Abbildung 18). Der Gasspeicher befindet sich unter dem Foliendach des Reaktors. Der elektrische Wirkungsgrad der beiden BHKW (Schnell mit Motoren 6R20.1BO) wird mit 44,78 % angegeben. Zur Schwefelreduktion wurde Eisenhydroxid zugesetzt. Die Fermentation fand bei mesophilen Temperaturen (Richtwert: 42°C) statt. Die BGA der AGT ist ebenfalls mit einem Pressschneckenseparator ausgerüstet.

Der anfallende Festmist als auch die Gülle aus der Milchviehhaltung werden als Einsatzstoffe für die BGA des Agrarbetriebs genutzt.

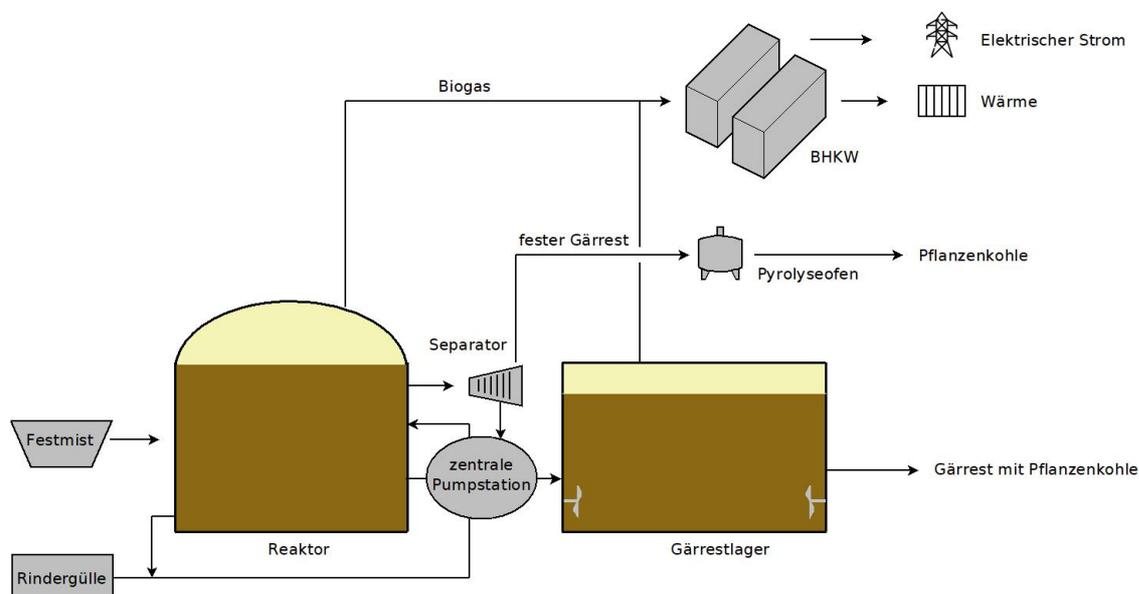


Abbildung 18: Biogasanlage der AGT in Tauche

5.1.3.2.2 Prozesskontrolle

Zu Beginn des Projekts wurde die biologische Leistungsfähigkeit der BGA des LGH und der AGT für das Jahr 2018 ermittelt und mit Erwartungswerten der FNR verglichen. Die FNR (2016) gibt die zu erwartenden Methanerträge für Rinderfestmist und Gülle mit 33 bis 36 m³/t und 11 bis 21 m³/t an. Die durchschnittlichen Methanerträge des Jahres 2018 lagen bei 45 (LGH) und 36 m³/t (AGT). Die Anteile des energiereichen Festmists im Input betragen durchschnittlich 51,3 % und 41,0 %. Der Rest war jeweils Gülle. Die Erwartungswerte beliefen sich somit auf 26 und 24 m³/t. Aufgrund der hohen Abweichungen der Methanerträge von den Erwartungswerten, wurden während der Testphase, in der pflanzenkohlehaltiger Festmist vergoren wurde, die Methanausbeuten als Leistungsparameter berechnet und mit den entsprechenden Erwartungswerten verglichen. Die FNR gibt die zu erwartenden Methanausbeuten für Festmist und Gülle mit 130 bis 330 und 110 bis 360 m³/t_{TS} an.

Während der Testphase wurde der Prozess der Biogasbildung intensiv beobachtet und kontrolliert. Das täglich gebildete Methanvolumen wurde unter Einbeziehung der erzeugten Strommenge berechnet. Der oTS-Gehalt der Eingangsstoffe wurde mindestens alle vier Monate analysiert. Zudem wurde die Prozessflüssigkeit in Reaktor und Gärrestlager hinsichtlich ihres Gehalts an flüchtigen Fettsäuren (FFS) mindestens alle sechs Wochen untersucht. Eine sinkende Methanbildung und Säuregehalte von mehr als 2 g/L würden auf eine Hemmung der Bakterien bzw. methanogenen Archaeen hindeuten (FNR, 2016). Der im Reaktor wirksame Ammoniakgehalt wird anhand des pH-Werts, des Ammoniumgehalts und der Prozesstemperatur berechnet (FNR, 2016). Die genannten Parameter wurden ebenfalls regelmäßig bestimmt. Die Mikroorganismen können sich an hohe Ammoniakkonzentrationen adaptieren. Demzufolge werden in der Literatur unterschiedliche Hemmkonzentrationen genannt. Die FNR (2016) gibt Schwellenwerte für die Hemmkonzentration zwischen 150 und 700 mg/L an.

Die Separation wurde anhand des TS-Gehaltes der festen Gärreste überprüft. Die Beprobung der separierten festen Gärreste erfolgte im Abstand von vier Monaten. Die Analysemethoden für die relevanten chemischen Parameter der Prozesskontrolle sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 11: Parameter für die chemische Analytik

Probe	chemische Parameter
Festmist	pH, LF, TS, oTS, FFS, N _{ges} , NH ₄ -N, SPE
Gülle	pH, LF, TS, oTS, FFS, N _{ges} , NH ₄ -N, SPE
Reaktorinhalt	pH, LF, TS, oTS, FFS, N _{ges} , NH ₄ -N, SPE
Gärrestlagerinhalt	pH, LF, TS, oTS, FFS, N _{ges} , NH ₄ -N, P, K, SPE
Gärrest	pH, LF, TS, oTS, FFS, N _{ges} , NH ₄ -N, P, K, SPE
Pflanzkohle	pH, LF, TS, oTS, C, N, S, SPE

5.1.3.2.3 Auswertung LGH

Die Vergärung von pflanzkohlehaltigem Festmist wurde in der BGA des LGH während 60 Wochen (September 2021 – Oktober 2022) getestet. Das LGH hat ab Juli 2021 kontinuierlich 70 L Pflanzkohle pro Tag in einen Stall eingebracht. Ab dem 27.08.2021 wurde kontinuierlich pflanzkohlehaltiger Festmist als Eingangsstoff für die BGA verwendet. Die Pflanzkohle wurde aus 100 % Gärrest hergestellt (Temperatur ca. 850°C, Haltedauer ca. 100 Minuten).

Tabelle 12: Zeiträume der Testphase, LGH

Zeitraum	Kalenderwoche	Testwoche	Tage	Ausfall Fütterung	Ausfall BHKW
I	36/2021 – 48/2021	1 - 13	91	0 Tage	0 Tage
II	49/2021 – 10/2022	14 - 27	98	0 Tage	0 Tage
III	11/2022 – 23/2022	28 - 40	91	0 Tage	6 Tage
	24/2022 – 30/2022	41 - 47	49	14 Tage (KW 26 - 28)	0 Tage
IV	31/2022 – 43/2022	48 - 60	91	0 Tage	0 Tage

Der Gehalt an Pflanzkohle im Substrat lag mit durchschnittlich 0,25 kg_{TS}/t sehr niedrig. Über die Zeit hätte sich jedoch Pflanzkohle im Reaktor ansammeln und Veränderungen in der

Methanproduktion zeigen können. Daher wurden die Methanausbeuten von vier aufeinander folgenden Zeiträumen (ZR) miteinander verglichen. Die Dauer der ZR umfasste jeweils mindestens eine mittlere hydraulische Verweilzeit. ZR I lag innerhalb der Kalenderwochen (KW) 36 bis 48/2021, ZR II 49/2021 bis 10/2022, ZR III 11 bis 23/2022, ZR IV 31/2022 bis 43/2022 (Tabelle 12). In KW 26/2022 wurde die Beschickung des Reaktors mit Eingangsstoffen für 14 Tage unterbrochen. Der Beginn des ZR IV wurde auf KW 31/2022 verschoben, um nicht Methanausbeuteverluste aufgrund der Fütterungspause und damit einhergehender verminderter mikrobiologischer Aktivität zu erfassen. In ZR III konnte an sechs Tagen kein Strom erzeugt werden. Der Grund hierfür waren Wartungs- und Reparaturarbeiten an den BHKW. Die Eingangsstoffe sowie der separierte Gärrest wurden regelmäßig im Abstand von vier Monaten untersucht. Für die Prozesskontrolle wurden Proben an Prozessflüssigkeit aus dem Reaktor und dem Gärrestlager entnommen. Die Beprobung fand alle vier bis sechs Wochen statt.

Der Rinderfestmist wies einen organischen Trockensubstanzgehalt (oTS) von 26 ± 5 % auf (Tabelle 13). Während der Testphase wurde eine Substratmischung mit einem Festmistanteil von durchschnittlich 58,7 % vergoren. Die restliche Frischmasse machte Gülle aus, die mit einem mittleren oTS-Gehalt von 0,3 % ein sehr geringes Biogasbildungspotenzial hatte. Der oTS-Gehalt der Substratmischung betrug $15,3 \pm 2,9$ %. Der Gehalt an Pflanzenkohle in der Substratmischung bzw. im Festmist lag bei 0,25 bzw. 0,42 kg_{TS}/t. Die Substratmischung der LGH wies einen Mangel an Kobalt auf. Die Kobaltkonzentration in der Substratmischung betrug 0,09 mg/kg bzw. 0,60 mg/kg_{oTS} (Tabelle 14, Tabelle 15). Bei der Vergärung von Mais- und Roggensilage testeten Abdoun und Weiland (2009) erfolgreich eine Spurenelementlösung mit der Bezeichnung DSMZ 44. Die Dosierung lag bei 10 mL pro kg_{oTS}-Zugabe, wobei eine 5-fach konzentrierte Lösung verwendet wurde. Demzufolge wird eine Dosierung von 2,23 mg/kg_{oTS} Kobalt empfohlen (Tabelle 15). Im Hinblick darauf, dass Kobalt mit Carbonaten, Phosphaten, etc. schwerlösliche Verbindungen eingehen kann und dann für die Mikroorganismen nicht mehr zur Verfügung steht, ist die Dosierempfehlung u. U. sehr hoch gewählt.

Tabelle 13: chemische Parameter der Eingangsstoffe und des Substrats (LGH)

Eingangsstoffe	pH	LF mS/cm	TS		oTS		N _{ges} mg/kg	NH ₄ -N mg/kg
			%	% _{oTS}	%	%		
Rinderfestmist	8,7	21	29,31 ±4,68	88 ±2	25,90 ±4,82	5573 ±1823	647 ±794	
Gülle	7,6	8	0,59 ±0,13	44 ±5	0,26 ±0,09	946 ±175	758 ±192	
Substrat	n.b.	n.b.	17,45 ±2,80	88 ±2	15,31 ±2,87	3662 ±1142	693 ±546	

Tabelle 14: Gehalt an Spurenelementen in Eingangsstoffen und Substrat in mg/kg (LGH)

Material	Ca	Co	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	S	Zn
Festmist	2750	0,14	217	6408	945	49	0,23	438	0,18	1460	1161	37
Gülle	271	0,01	12	651	97	2,51	0,02	226	1,05	147	48	7
Substrat	1726	0,09	132	4030	594	30	0,14	350	0,54	917	701	25

Kobalt wurde wesentlich niedriger als die von Abdoun und Weiland (2009) empfohlene Menge dosiert. Das LGH hat mit der Dosierung von 0,13 mg/kg_{oTS} Kobalt eine als optimal einzustufende Konzentration von 0,16 mg/L Reaktorflüssigkeit erhalten. Die FNR (2016) gibt als Richtwert für die Kobaltkonzentration im Reaktor einen Wert von 0,12 mg/L an.

Die Pflanzenkohle enthielt durchschnittlich 2,02 mg/kg_{TS} Kobalt (Tabelle 15). Wollte man den Kobaltmangel im Substrat durch eine höhere Dosierung von Pflanzenkohle ausgleichen, dann wäre ein Gehalt an Pflanzenkohle im Festmist von mindestens 17 kg_{TS}/t erforderlich.

Tabelle 15: Durchschnittlicher Gehalt an Spurenelementen (LGH)

Element	Spurenelementelösung		Substrat- mischung
	Empfehlung	LGH	
	mg/kg _{oTS}	mg/kg _{oTS}	
Co	2,23	0,13	0,60
Mn	1,39	0,06	202
Mo	0,40	0,07	0,95
Ni	0,25	0,21	4,59
Zn	2,40	0,06	167

In den 60 Wochen der Testphase wurde der Reaktor des LGH durchschnittlich mit 1,79 kg_{oTS}/m³ d gefüttert. Die mittlere Methanausbeute betrug 276 m³/t_{oTS} (

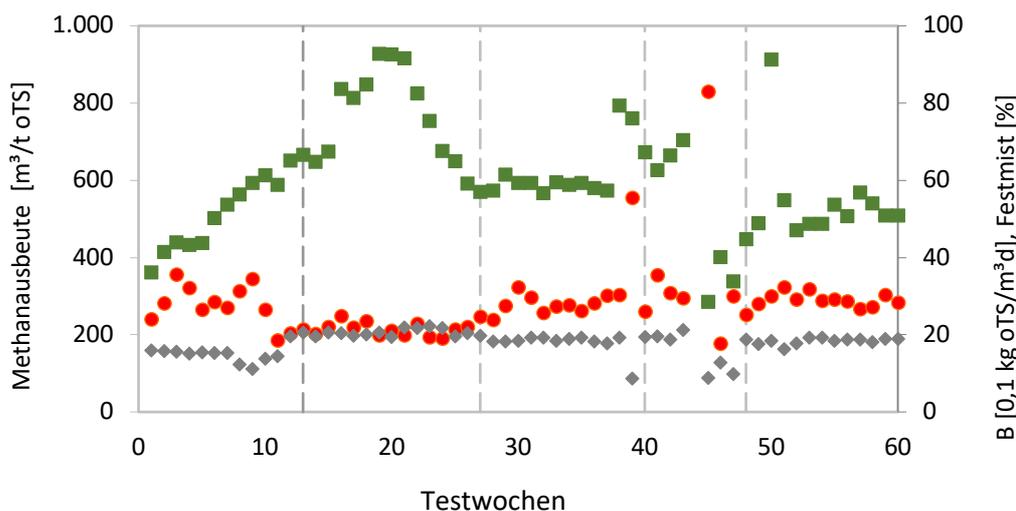


Abbildung 19).

Abbildung 19: Methanausbeute (rot), Raumbelastung (B, grau) und Festmistanteil (grün) während der Testphase (LGH)

Während der ZR III und IV wurden die höchsten Methanausbeuten von 302 und 300 m³/t_{oTS} ermittelt (Tabelle 16). Der Festmistanteil lag in diesen ZR bei 52 und 62 %. Die geringste Methanausbeute wurde für ZR II berechnet, wobei der Festmistanteil 74 % betrug. Der Abbau der Strohinhaltsstoffe im Festmist dürfte bei der Vergärung die längste Zeit in Anspruch genommen haben. Shi et al. (2017) untersuchten den Effekt unterschiedlicher hydraulischer

Verweilzeiten auf die Biogas- und Methanproduktion aus Weizenstroh bei 35°C. Die Steigerung der Verweilzeit von 20 auf 40 Tage war mit einer Steigerung der Methanausbeute um 71 % verbunden. Eine Verweilzeit von 60 Tagen führte zu einer weiteren Steigerung der Methanausbeute um 12 %. Während der vier ZR lag die mittlere hydraulische Verweilzeit der Substratmischungen im Reaktor zwischen 75 und 94 Tagen und übertraf somit die von Shi et al. (2017) genannte Verweilzeit von 60 Tagen. Die hohen Methanausbeuten in ZR III und IV deuten darauf hin, dass das Einbringen von kohlehaltigem Festmist den Biogasprozess nicht negativ beeinflusste. Dieser Zusammenhang wird unterstützt durch die Vergleichswerte für den ZR III in den Jahren 2019 und 2020. Die mittleren Methanausbeuten lagen bei rund 303 m³/t_{oTS} und somit ebenfalls 30 % über den erwarteten Methanausbeuten (Tabelle 17).

Tabelle 16: Methanausbeuten während der Zeiträume I bis IV (LGH)

Zeit- raum	Dauer d	t _M d	Belastung kg _{oTS} /m ³ d	Substrat % _{Mist} % _{oTS}	PK ¹ kg _{TS} /m ³	Methanausbeute m ³ /t _{oTS}	Erwartung m ³ /t _{oTS}	Abweichung ² %
I	91	86	1,54	50,6 13,2	0,25	277	232	20
II	98	94	2,05	74,3 19,3	0,53	224	231	-3
III	91	89	1,78	61,6 16,0	0,78	302	232	30
IV	91	75	1,84	52,4 13,7	1,19	300	232	29

¹ bei vollständigem Verbleib der PK im Reaktor

² Abweichung der Methanausbeute vom Mittelwert der erwarteten Methanausbeute

Tabelle 17: Methanausbeuten der BGA LGH (Zeitraum III, KW 11 bis 23)

Jahr	t _M d	Belastung kg _{oTS} /m ³ d	Substrat % _{oTS}	Methanausbeute m ³ /t _{oTS}	Erwartung m ³ /t _{oTS}	Abweichung %
2019	69	1,23	8,5	302	233	30
2020	84	1,44	12,0	303	232	31
2021	69	2,05	14,2	235	232	1
2022	89	1,78	16,0	302	232	30

Die niedrigere Raumbelastung des Reaktors mit maximal 2,05 kg_{oTS}/ m³ d in ZR II garantierte, dass die flüchtigen Fettsäuren von den methanogenen Archaeen zeitnah abgebaut wurden. Die FFS-Konzentration lag bei 0,3 ±0,1 g/L (Tabelle 18). Die Leitfähigkeit (LF) kann mit maximal 25 mS/cm ebenfalls als unbedenklich eingestuft werden. Auch die Kaliumwerte von durchschnittlich 4,5 g/L unterschritten die Hemmkonzentration. Unter Berücksichtigung eines pH-Wertes von 7,9 wurde während der Testphase in ZR IV (KW 40) die höchste Ammoniakkonzentration von 524 mg/L ermittelt. Dies war auf die zu diesem Zeitpunkt sehr hohe Prozesstemperatur von 44,9 °C zurückzuführen. Eine Hemmung des Prozesses war nicht erkennbar. Die Mikroorganismenpopulation hatte sich offensichtlich an die hohe Ammoniakkonzentration adaptiert.

Während der Pyrolyse des Gärrestes verdunstet Wasser. Dieser Wasserverlust wurde zum Teil ausgeglichen durch das Ablöschen des Materials nach der Pyrolyse. Der TS-Gehalt in der

Pflanzkohle lag bei durchschnittlich 48 %. Der separierte Gärrest wies einen Durchschnittswert an TS von 32 % auf (Tabelle 18, Tabelle 19). Ein Vergleich von Inhaltsstoffen bezogen auf die TS von Gärrest und Pflanzkohle macht deutlich, dass bei der Pyrolyse des Gärrestes oTS umgesetzt und Stickstoffverbindungen freigesetzt wurden. Der oTS-Gehalt sank von durchschnittlich 87 %_{TS} im Gärrest auf 52 %_{TS} in der Pflanzkohle, der Gehalt an N_{ges} fiel von 17 auf 11 kg/t_{TS}.

Tabelle 18: Parameter der Suspensionen in Reaktor und Gärrestlager (LGH)

Inhalt	pH	LF mS/cm	TS %	oTS % _{TS}	FFS kg/m ³	N _{ges} g/m ³	NH ₄ -N g/m ³
Reaktor	7,8 ±0,2	22 ±2	10 ±2	69 ±7	6,4 ±0,8	0,3 ±0,1	5355 ±267
Gärrestlager	7,8 ±0,2	23 ±2	8 ±1	71 ±3	5,8 ±0,8	0,2 ±0,1	5339 ±416

Tabelle 19: Parameter des Gärrests (LGH)

	TS %	oTS % _{TS}	N _{ges} g/m ³	NH ₄ -N (flüssiger Gärrest), g/t (separierter Gärrest)	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O
Flüssiger Gärrest	8	71	5339	3167	1212	2777	4328	5213
Separierter Gärrest	32	87	5489	2527	2739	6276	4692	5652

Die essenziellen Spurenelemente wurden während des Pyrolyseprozesses in der Pflanzkohle angereichert. Die Konzentrationen an Co, Fe, Mn und Ni in der TS der Pflanzkohle waren im Vergleich zum Gärrest mehr als doppelt so hoch (Tabelle 19). Der Faktor für Mo und Zn lag bei 1,4 und 1,3.

Tabelle 20: Essenzielle Spurenelemente im separierten Gärrest und der Pflanzkohle (LGH)

Element	Gärrest	Kohle	Kohle/Gärrest
	mg/kgTS	mg/kgTS	
Co	0,93	2,02	2,2
Fe	1786	5178	2,9
Mn	192	427	2,2
Mo	1,06	1,46	1,4
Ni	3,13	6,76	2,2
Zn	152	204	1,3

5.1.3.2.4 Auswertung AGT

Die Projektpartner planten (Stand: Frühjahr 2021) die Erprobung der Pflanzkohle in der BGA der AGT zeitgleich zur Testphase bei dem LGH durchzuführen. Entgegen den Erwartungen hat die AGT während des Projektzeitraumes keine bzw. keine nennenswerten Mengen an Pflanzkohle in die BGA eingetragen. Die Testphase umfasst wie bei der LGH den Zeitraum von 60 Wochen (September 2021 bis Oktober 2022) und ist als Referenzphase zur Testphase bei der LGH zu verstehen. Zudem lieferten die Ergebnisse auch bei der AGT wichtige Daten

zur Dosierung von Spurenelementen. Die Anreicherung des Substrates mit einer handelsüblichen Spurenelementelösung könnte durch das Einbringen von Gärrestkohle auch bei der AGT anteilig ersetzt werden (Sanchez et al., 2021).

Der Festmistanteil in der Substratmischung lag während der Testphase im Mittel bei 50,9 %. Der oTS-Gehalt im Festmist und in der Substratmischung betrug 20 ± 5 % und 13 ± 3 % (Tabelle 21). Die Konzentrationen an Gesamt- und Ammoniumstickstoff in der Substratmischung waren mit 4.623 und 992 mg/kg höher als in der Substratmischung der LGH. Das Substrat der AGT wies ebenfalls einen Mangel an Kobalt auf. Die Kobaltkonzentration betrug durchschnittlich 0,14 mg/kg bzw. 1,1 mg/kg_{oTS} (Tabelle 22, Tabelle 23).

Tabelle 21: chemische Parameter der Eingangsstoffe und des Substrats (AGT)

Eingangsstoffe	pH	LF	TS	oTS		N _{ges} mg/kg	NH ₄ -N mg/kg
		mS/cm	%	% _{oTS}	%		
Rinderfestmist	8,9	17	25,86 ±3,20	76 ±13	20,06 ±5,42	6401 ±1570	981 ±548
Gülle	6,8	10	8,35 ±1,35	73 ±4	6,07 ±0,74	2780 ±245	1004 ±10
Substrat	n.b.	n.b.	17,26 ±2,29	76 ±7	13,19 ±3,12	4623 ±919	992 ±336

Während der 60-wöchigen Testphase wurde eine Methanausbeute von 273 ± 104 m³/t_{oTS} erzielt. Die Abweichung von der mittleren Ausbeute (Erwartungswert), die die FNR (2016) für diese Substratmischung angibt, betrug 18 %. Die Methanausbeuten des ZR III (KW 11 bis 23) in den Jahren 2019 bis 2022 wichen vom Erwartungswert um 20 bis 38 % ab (Tabelle 24). Die Methanausbeuten lagen jedoch im Schwankungsbereich, der für diese Substrate angegeben wurde (FNR, 2016).

Tabelle 22: Gehalt an Spurenelementen in Eingangsstoffen und Substrat in mg/kg (AGT)

Material	Ca	Co	Fe	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni	P	S	Zn
Festmist	3846	0,19	479	6644	1644	49	0,19	668	0,54	1400	1293	24
Gülle	3418	0,09	185	1922	1891	39	0,08	339	0,25	635	429	15
Substrat	3636	0,14	335	4325	1765	44	0,13	507	0,40	1025	869	20

Tabelle 23: Durchschnittlicher Gehalt an Spurenelementen (AGT)

Element	Empfehlung mg/kg _{oTS}	Substrat mg/kg _{oTS}
Co	2,23	1,09
Mn	1,39	335
Mo	0,40	1,01
Ni	0,25	3,03
Zn	2,40	149

Die Raumbelastung des Reaktors der AGT betrug während der Testphase maximal 2,48 kg_{oTS}/(m³ d). Eine Hemmung des Biogasbildungsprozesses war nicht zu beobachten, da der Gehalt an flüchtigen Fettsäuren durchschnittlich bei $0,6 \pm 0,9$ g/L lag (Tabelle 25). Der

Ammoniumstickstoffgehalt wurde durchschnittlich mit 1963 mg/L bestimmt. Die Ammoniakkonzentration lag maximal bei 215 mg/L und kann als unbedenklich eingeordnet werden.

Tabelle 24: Methanausbeuten der BGA AGT (Zeitraum III, KW 11 bis 23)

Jahr	t _M d	Belastung kg _{oTS} /m ³ d	Substrat % _{oTS}	Methanausbeute m ³ /t _{oTS}	Erwartung m ³ /t _{oTS}	Abweichung %
2019	95	1,26	12,0	281	233	21
2020	121	0,88	10,6	321	233	38
2021	150	1,01	15,2	311	232	34
2022	113	1,21	13,7	278	232	20

Der oTS-Gehalt des separierten Gärrestes betrug durchschnittlich 77 %_{TS} (Tabelle 26). Da der oTS-Gehalt des LGH-Gärrestes in der gleichen Größenordnung (87 %_{TS}) lag, ist im Falle der Pyrolyse mit einer Verdopplung der Kobaltkonzentration zu rechnen. Es ist zu erwarten, dass eine Pflanzenkohle aus 100 % separiertem Gärrest der AGT etwa 2 mg/kg_{TS} Kobalt enthält (Tabelle 27). Infolge der Anreicherung des Futters mit Spurenelementen wurde eine Kobaltkonzentration im Reaktor von durchschnittlich 0,16 mg/L erzielt. Beide Parameter, Kobaltkonzentration der Gärrestkohle und der Reaktorflüssigkeit, sind wichtige Größen, um bei zukünftiger Dosierung von Gärrestkohle eine optimale Versorgung der Mikroorganismen mit Spurenelementen im Reaktor zu gewährleisten.

Tabelle 25: Parameter der Suspensionen in Reaktor und Gärrestlager (AGT)

Inhalt	pH	LF mS/cm	TS %	oTS % _{TS}	FFS kg/m ³	N _{ges} g/m ³	NH ₄ -N g/m ³	
Reaktor	7,8 ±0,2	15 ±2	10 ±3	62 ±4	6,2 ±2,1	0,6 ±0,9	4444 ±759	1963 ±247
Gärrestlager	7,7 ±0,2	18 ±2	8 ±1	65 ±6	5,2 ±1,2	0,2 ±0,2	4201 ±458	2073±128

Tabelle 26: Parameter des Gärrests (AGT)

	TS %	oTS % _{TS}	N _{ges} g/m ³ (flüssiger Gärrest)	NH ₄ -N g/t (separierter Gärrest)	P	P ₂ O ₅	K	K ₂ O
Flüssiger Gärrest	8	65	4201	2073	799	1832	3642	4388
Separierter Gärrest	30	77	6322	1136	1418	3249	4257	5128

Tabelle 27: Essenzielle Spurenelemente im separierten Gärrest (AGT)

Element	Gärrest mg/kg _{TS}
Co	1,01
Fe	3132
Mn	254
Mo	0,49
Ni	1,65
Zn	96

5.1.4 Nutzung der Pflanzenkohle zur Verbesserung der Bodeneigenschaften

Am ATB wurden Laborversuche zur Wirkungsweise der PK zur Verbesserung der Bodeneigenschaften in Form von Keim- und Wachstumsversuchen sowie Messungen zur Wasserhaltekapazität durchgeführt.

5.1.4.1 Wirkung der Pflanzenkohle auf das pflanzliche Keimverhalten

Um die Wirkung der Pflanzenkohle auf das Keimverhalten projektbezogen beschreiben zu können, wurden Keimtests nach DIN EN 16086-2 mit Kresse durchgeführt (Abbildung 20, Abbildung 21). Abweichend von dieser Testvorschrift, wurde für die Durchführung der Tests statt Einheitserde Boden aus der AGT und LGH verwendet.

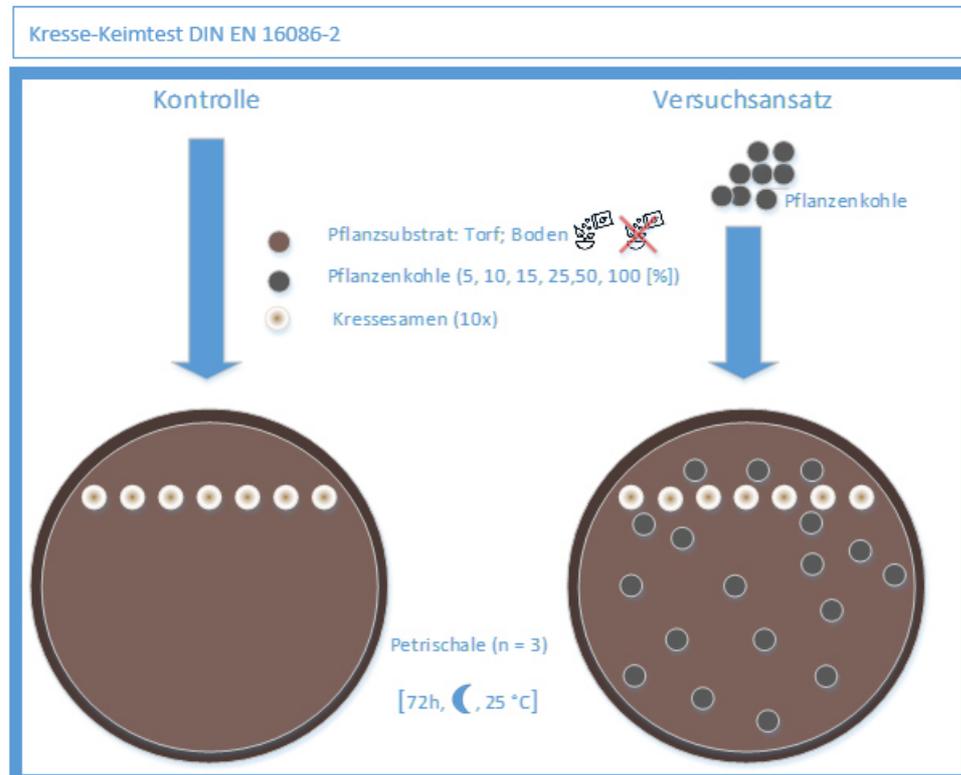


Abbildung 20: Versuchsschema des Kressekeimtests DIN EN 16086-2.

Beim Einsatz von Torf mit unterschiedlichen Pflanzenkohlebeimengungen als Kultursubstrat, erhöhte sich mit zunehmender Pflanzenkohlemenge (außer 100 % PK) auch die Hypokotyl- und Wurzellänge (Abbildung 22) in der gedüngten wie auch ungedüngten Variante. Keimlinge mit kräftigen ausgebildeten oberirdischen Pflanzenteilen (Hypokotylen) und Wurzeln besitzen gegenüber reduzierteren Exemplaren einen Wettbewerbsvorteil für das frühe Wachstum, da sie durch die längeren Wurzeln in tiefere Bodenschichten vordringen können, um Wasser und Nährstoffe aufzunehmen. Ebenso ermöglicht die raschere Entwicklung des Hypokotyls der Pflanze eine frühere autotrophe Ernährungsweise in Form von Photosynthese und somit eine zeitigere Unabhängigkeit von den begrenzten Nährstoffen des Samenendosperms.

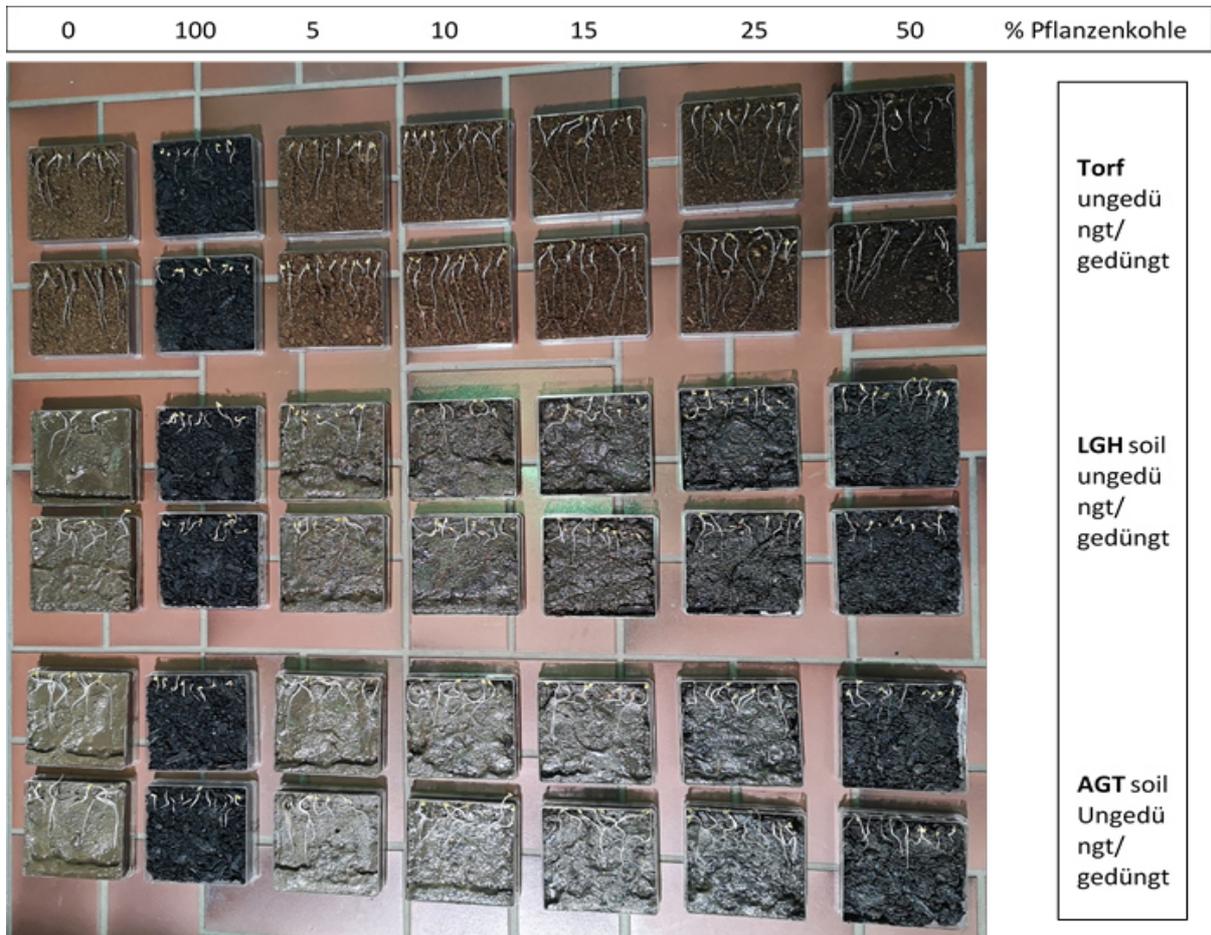


Abbildung 21: Ergebnisse eines Kressekeimtests gedüngt/ ungedüngt mit unterschiedlichen Pflanzkohlebeimengungen in Torf und Boden des LGH sowie der AGT.

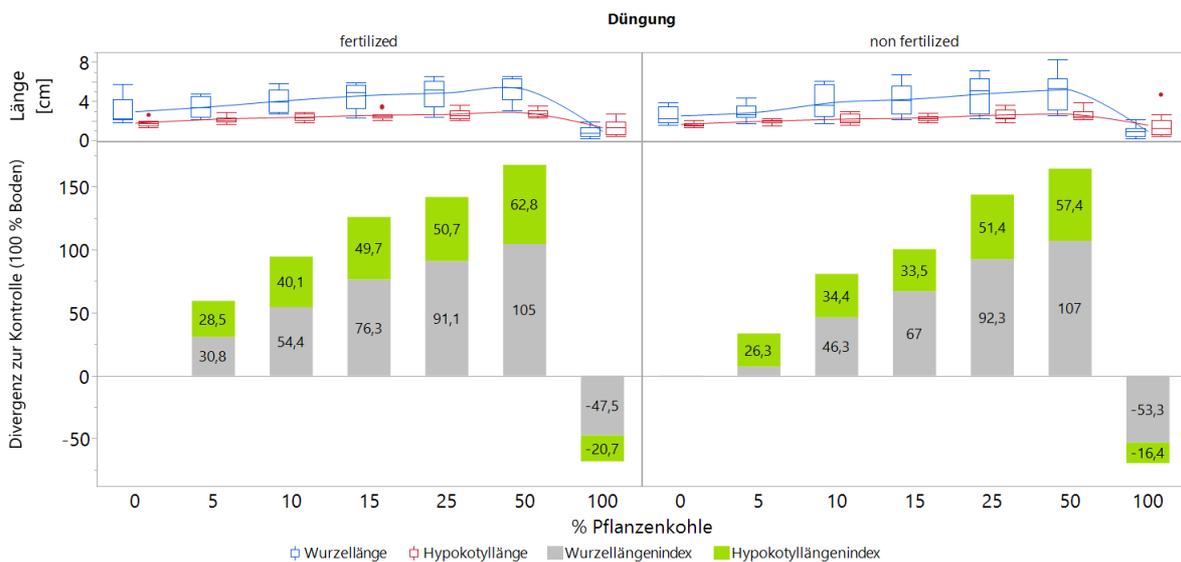


Abbildung 22: Längenmessungen sowie relative Divergenz zur Kontrolle des Kressekeimtest nach DIN EN 16086-2 mit Pflanzkohlebeimengung von 0, 5, 10, 15, 25, 50 und 100 % zu Torf.

Die Ergebnisse mit Torf konnten beim Einsatz von Boden der LGH und AGT nicht reproduziert werden. So ergaben sich für die LGH im Vergleich zur Kontrolle nur längere Hypokotyle für die

Kohlebeimengungen von 5 bis 25 % für beide Düngungsvarianten, allerdings nur verlängerte Wurzeln für die ungedüngte Variante bei 5 und 10 % PK-Anteil (Abbildung 23).

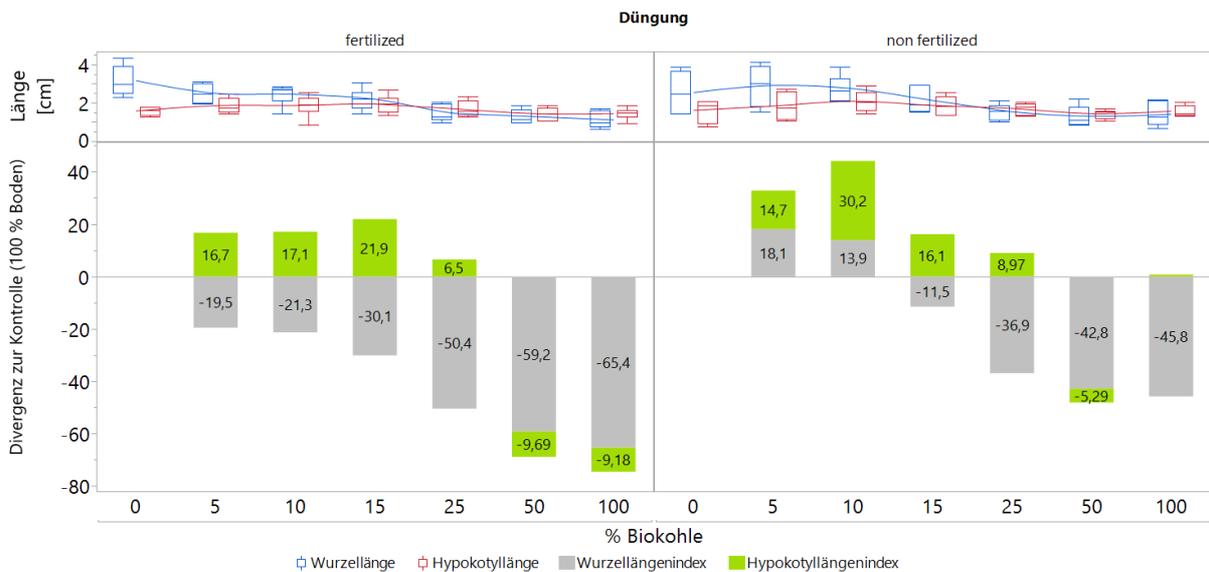


Abbildung 23: Längenmessungen sowie relative Divergenz zur Kontrolle des Kressekeimtest nach DIN EN 16086-2 mit Pflanzenkohlebeimengung von 0, 5, 10, 15, 25, 50 und 100 % zu Boden des LGH.

Der Boden der AGT hingegen ergab nur für die Varianten gedüngt, 15 und 25 % PK und ungedüngt, 5, 10, 15 und 25 % längere Hypokotyle als der reine Boden und in der Regel eine zunehmende Abnahme der Wurzellänge mit steigender PK-Beimengung für beide Düngungsvarianten (Abbildung 24).

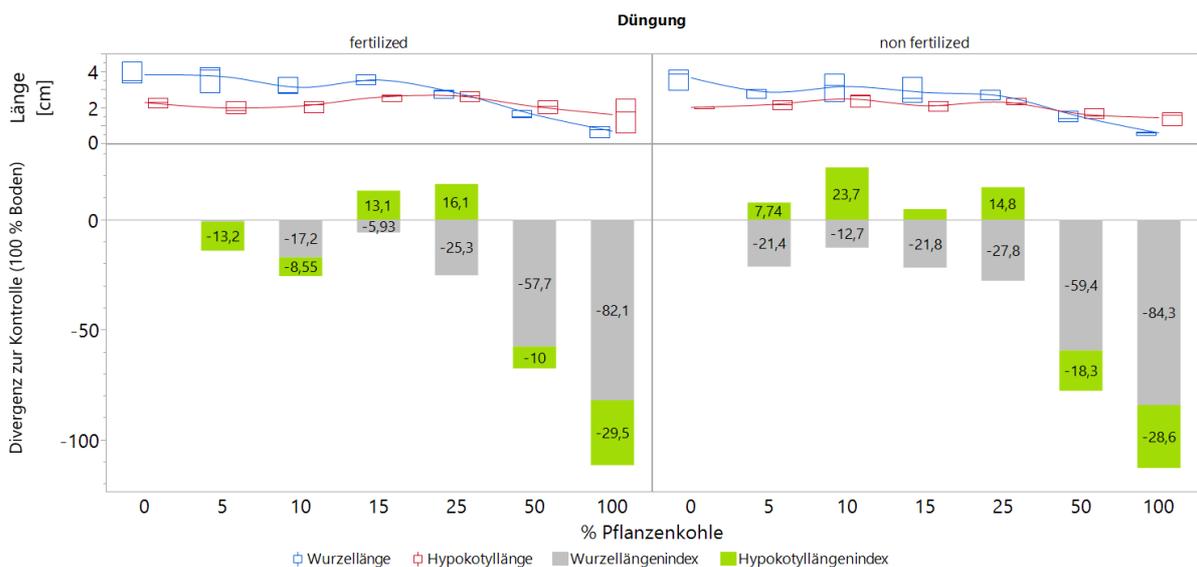


Abbildung 24: Längenmessungen sowie relative Divergenz zur Kontrolle des Kressekeimtest nach DIN EN 16086-2 mit Pflanzenkohlebeimengung von 0, 5, 10, 15, 25, 50 und 100 % zu Boden der AGT.

Da die Keimversuche mit den 3 Substraten (Torf, Boden LGH und Boden AGT) alle mit der gleichen Pflanzenkohle durchgeführt wurden, kann geschlussfolgert werden, dass die PK an sich keine keimverhindernde Wirkung besitzt, da die Ergebnisse mit der PK-Torfmischung

ausschließlich verbessernd ausgefallen sind. Somit resultieren die nicht ganz so eindeutigen Ergebnisse zur Keimung aus den Versuchen mit Boden, aus den Eigenschaften der Pflanzen bzw. der PK-Boden-Wechselwirkung. Da, methodisch bedingt, durch die Keimtests keine Aussagen zu Effekten einer länger anhaltenden Pflanzenkohleeinwirkung sowie deren Auswirkungen auf die Reproduktion (Saatgut, Blütenbildung und Wachstum) gemacht werden können, wurden weiterführende Wachstumsversuche in Hydrokultur (Abbildung 25) und Topfversuchen (Abbildung 35) durchgeführt.

5.1.4.2 Wirkung der Pflanzenkohle auf das Pflanzenwachstum

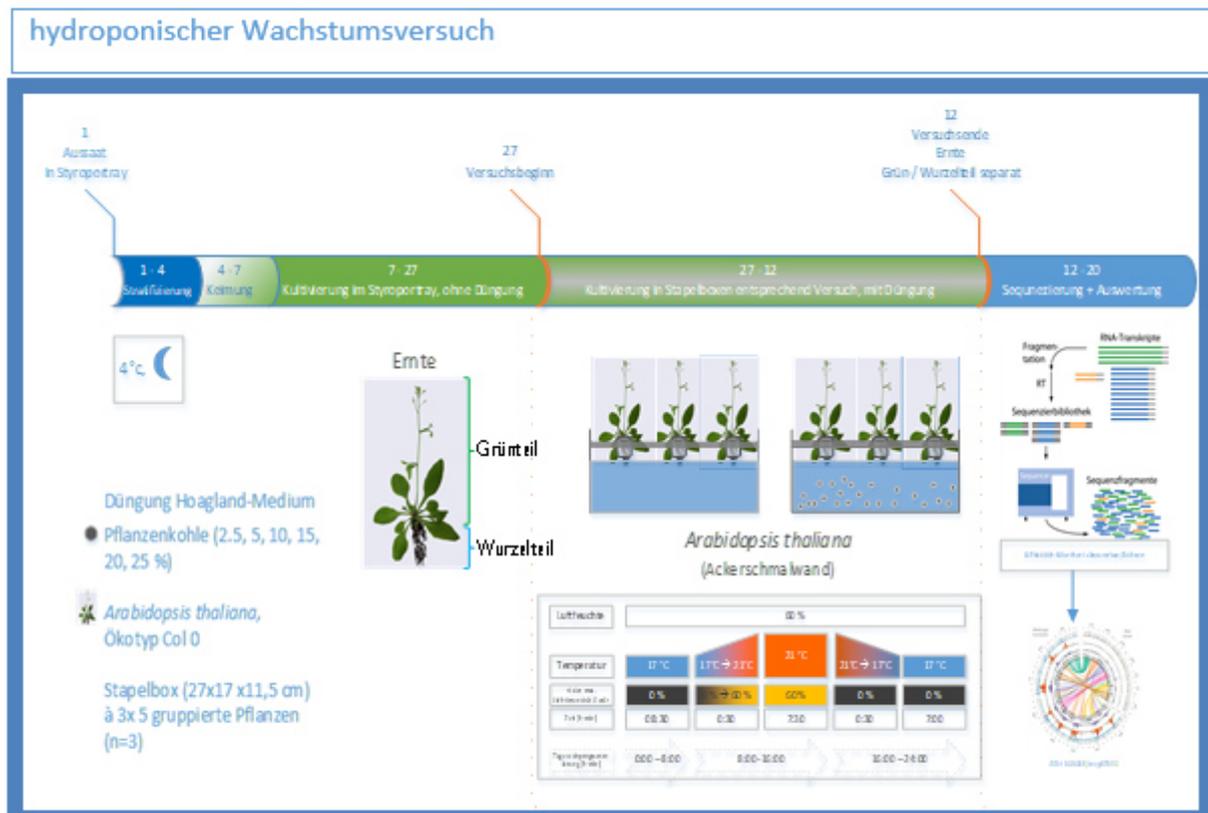


Abbildung 25: Versuchsschema zu den hydroponischen Wachstumsversuchen mit unterschiedlichen Pflanzenkohlebeimengen. Der pflanzliche Modellorganismus *Arabidopsis thaliana* (Ökotyp Col-0) wurde für die bessere Untersuchbarkeit des Transkriptom genutzt.



Abbildung 26: Pflanzenklimakammer zur Pflanzenanzucht (Fitotron HGC 1014 V; FA. Vötsch) – UV, Temperatur und Luftfeuchte

Ziel der hydroponischen Wachstumsversuche war es, den Einfluss der Pflanzenkohle auf das Pflanzenwachstum zu erfassen (Abbildung 25). Dazu wurden Samen der Modellpflanze *Arabidopsis thaliana* (Ökotyp Col-0) unter standardisierten Hydrokulturbedingungen auf Steinwollkegeln bis zu einer bestimmten Größe vorkultiviert und wuchsen dann über 40 Tage in Versuchsboxen mit Pflanzenkohle versetzt im Phytotron (Abbildung 26). Die Ernte erfolgte unter Trennung des Grün-

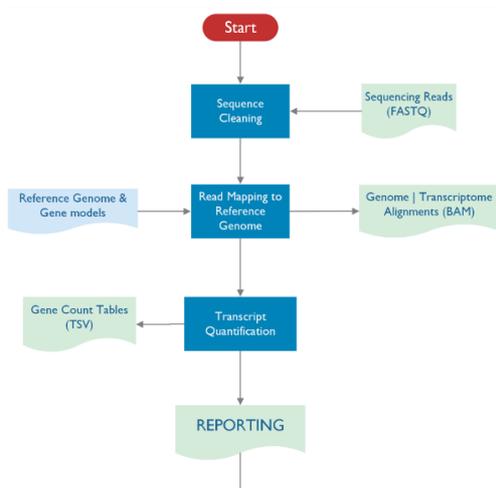


Abbildung 27: Schematische Darstellung der wichtigsten Schritte der Transkriptom-Analyse.

und Wurzelteil von jeweils 5 gepoolten Pflanzen, um anschließend mittels Transkriptomanalyse Unterschiede in den exprimierten Genen hinsichtlich der einzelnen Pflanzenkohlebeimengung nachzuweisen.

Für die Transkriptomanalytik wurde separat für Grün- und Wurzelteil jedes Pflanzenpools die mRNA isoliert und mittels reverser Transkription in DNA überführt. Die Gene der DNA-Proben wurden dann durch Next Generation Sequencing erfasst und mit der Referenzdatenbank TAIR10 zum Auffinden pflanzenkohleabhängiger Transkriptomveränderungen mit der Kontrollgruppe verglichen (Abbildung 27).



Abbildung 28: Entwicklung von Wurzel- und Grünteil der Pflanzenkohlebehandlungen (0, 2.5, 5, 10, 15, 20, 25 % Pflanzenkohle) an Versuchstag 13, 21 und 38.

Um auch optisch den Wachstumsverlauf (besonders auch der Wurzeln) dokumentieren zu können, wurden die Träger mit den Versuchspflanzen an 3 Versuchstagen aus der Versuchsbox mit der Hydronährlösung und den Gazesäckchen mit der jeweiligen PK-Konzentration herausgehoben und fotografiert (Abbildung 28).

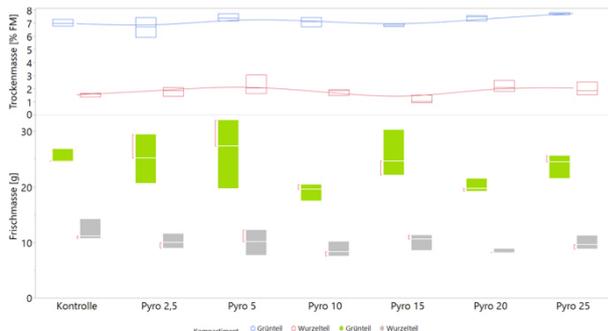


Abbildung 29: Ernteertrag (Frisch- und Trockenmasse) von Wurzel- und Grünteil der verschiedenen pflanzenkohlebehandelten

werden, dann ergibt sich, dass die 5%-PK-Variante durch die eventuell positive Wirkung der PK auf das Pflanzenwachstum zwar eine geringere Wurzelmasse, bei gleichzeitig höchster Grünteilfrischmasse hervorgebracht hat (Abbildung 29).

Die Kontrolle (0% PK-Zusatz) hat nach jeweils 13, 21 und 38 Versuchstagen signifikant die längsten Wurzeln ausgebildet (Abbildung 30). Nach 38 Versuchstagen sind mit steigender PK-Menge die durchschnittlichen Wurzellängen kürzer. Dieser Trend gilt grundsätzlich auch für die Versuchstage 13 und 21, jedoch mit einigen Ausreißern. Verglichen mit der Kontrolle zeigen die PK-versetzten Varianten zwischen den Versuchstagen 21 und 38 ein signifikant höheres Wurzellängenwachstum. Unter Hydrokulturbedingungen führt der Zusatz von PK zu einer Verzögerung im Wurzelwachstum und grundsätzlich kürzeren Wurzellängen im Vergleich zur Kontrolle.

Durch die Anwesenheit der PK sind die Wurzeln der PK-Varianten im Vergleich zur Kontrolle (ohne PK) dunkler gefärbt. Diese hat im Vergleich zu den PK-Varianten die höchste Wurzelfrischmasse. Die 5%-PK-Variante hat eine 3,99% höhere Grünteilfrischmasse als die Kontrolle. Folgt man der Annahme, dass die pflanzliche Entwicklung so effektiv wie möglich ist und nur maximal notwendige und von den äußeren Umständen ermöglichte Zellmassen gebildet



Abbildung 30: Durchschnittliche Wurzellängen [cm] von *A. thaliana* in Hydrokultur mit Zusatz von 0 (Kontrolle), 2,3, 5, 10, 15, 20 und 25 % PK an den Versuchstagen 13, 21 und 38. Die Buchstaben bezeichnen die Signifikanz.

Die Next Generation Sequencing (NGS)-Analyse der am Versuchstag 40 geernteten und gepoolten Pflanzen (getrennt in Grün- und Wurzelteil) zeigt die im Vergleich zur Kontrolle signifikant veränderten Genexpressionsniveaus von Gensets für den Grünteil (Abbildung 31) und den Wurzelteil (Abbildung 32) (GO-terms: <https://geneontology.org/>) für die einzelnen PK-Dosierungen. Die sehr komplexe Analyse der NGS-Daten wird noch fortgeführt. Die erste Zuordnung der GO's für die up- und downregulierten Gensets in die Übergruppen Pflanzenwachstum und Pflanzenabwehr ergibt die in Abbildung 33 gezeigte Verteilung. Für den Grünteil sind die meisten dem Wachstum zuzuordnenden GO's herunterreguliert, während

Genets welche für die pflanzliche Abwehr stehen, hochreguliert sind. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Resultaten von Viger et. al (2015).

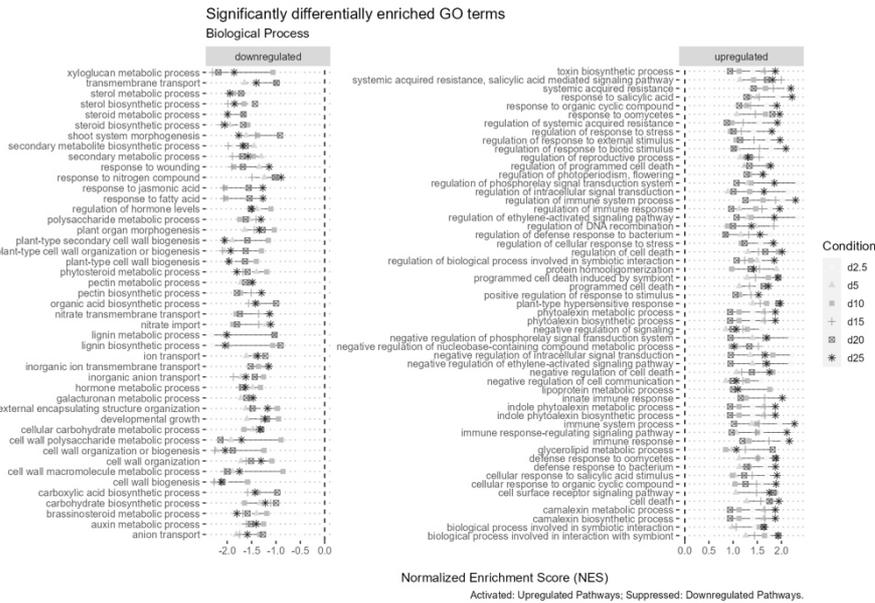


Abbildung 31: Signifikante Genexpressionsausprägungen für die einzelnen PK-Anwendungen (Condition: 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 %PK) im Vergleich zur Kontrollvariante (0 %PK) im Grünteil von *A. thaliana*. Gezeigt sind höher (upregulated) und niedriger (downregulated) exprimierte „Gencluster“ der sogenannten „GO-Terms“ (<https://geneontology.org>).

Abbildung 32: Signifikante Genexpressionsausprägungen für die einzelnen PK-Anwendungen (Condition: 2,5, 5, 10, 15, 20, 25 %PK) im Vergleich zur Kontrollvariante (0 %PK) im Wurzelteil von *A. thaliana*. Gezeigt sind höher (upregulated) und niedriger (downregulated) exprimierte „Gencluster“ der sogenannten „GO-Terms“ (<https://geneontology.org>).

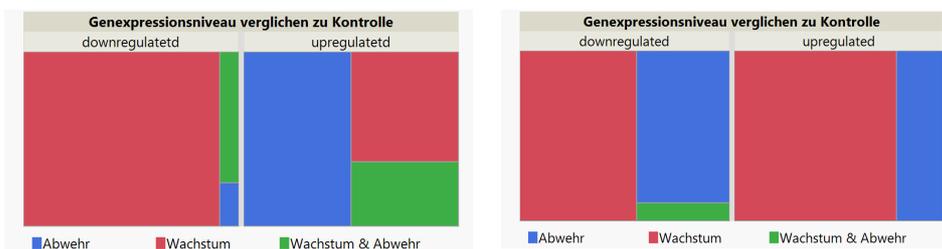
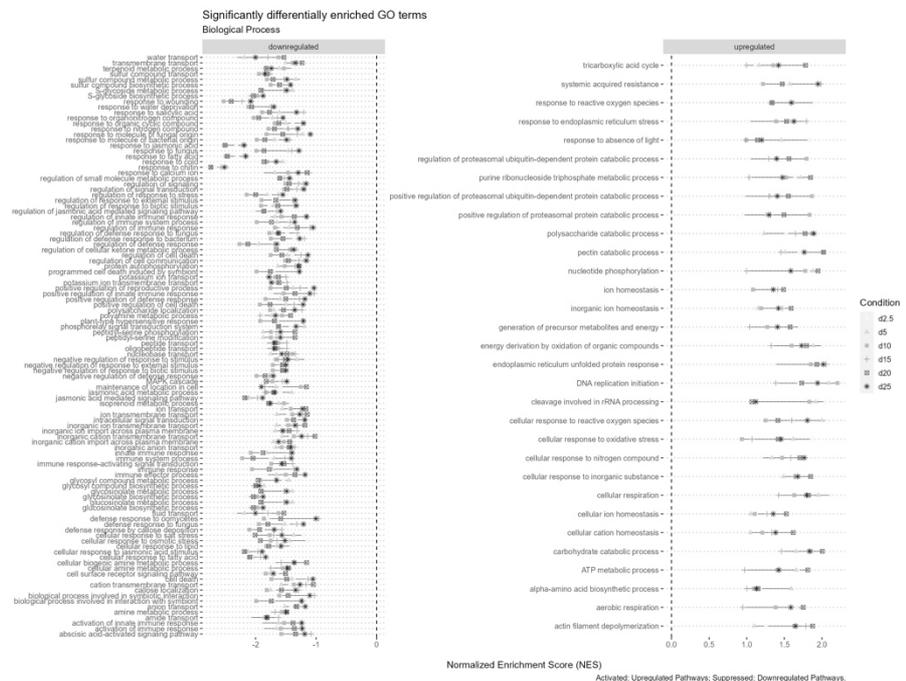


Abbildung 33: Zusammenfassung der Genexpressionsanalysen; links: Grünteil, rechts: Wurzelteil. Die in den vorigen Abbildungen aufgeführten Gencluster wurden in Übergruppen sortiert: Pflanzenwachstum (Wachstum); Pflanzenabwehr (Abwehr) sowie Gencluster, welche während des Pflanzenwachstums und der Abwehr (Wachstum & Abwehr) exprimiert wurden.



Befüllschema: Kohle als Pellets in Schicht 10 cm von unten eingebracht

Abbildung 35: Topfversuche mit Welschem-Weidelgras.

Ergänzend zu den Hydroversuchen wurden von 2021 bis 2022 Topfversuche mit Welschem Weidelgras in 6 L-Mitscherlich-Gefäßen durchgeführt. Die Ernteerträge von 4 Pflanzenkohlebeimengungen und der Kontrolle wurden über einen Zeitraum von 263 Tagen betrachtet. Die Beimengung von pelletierter Pflanzenkohle führte im ersten Erntezyklus im Vergleich zur Kontrolle zu verringerten Erntemengen, während im Erntezyklus 2 und 3 eine Erhöhung der Erntemenge bis 6% Pflanzenkohlebeimengung zu verzeichnen war (Abbildung 34).

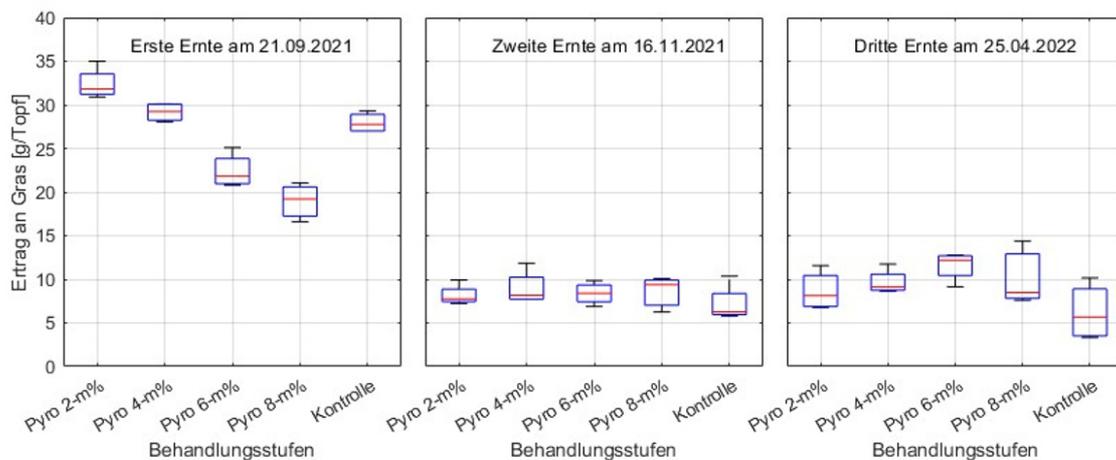


Abbildung 34: Ernteerträge von Welschem-Weidelgras in 3 Erntezyklen unter Beimengung unterschiedlicher Pflanzenkohlemengen (2, 4, 6, 8 % und Kontrolle).

5.1.4.3 Wirkung der Pflanzenkohle auf die Wasserhaltekapazität

Die Wirkung der PK auf das Wasserhaltevermögen im Boden wurde mit Hilfe von DIN EN 13041 bestimmt. Dabei wurden mit Bodenproben der LGH (Entnahmetiefe bis 30 cm) verschiedene Boden-PK-Mischungen hergestellt und der Wassergehalt der Probenzylinder der Testvorschrift entsprechend für mindestens 48 h mit der entsprechenden Saugspannung beaufschlagt. Es wurden Saugspannungen von -10, -50 und -100 [hPa] (dies entspricht den Saugspannungen von 10, 50 und 100 cm Bodentiefe) angelegt (Abbildung 37).

Bestimmung Wasserhaltekapazität DIN EN 13041

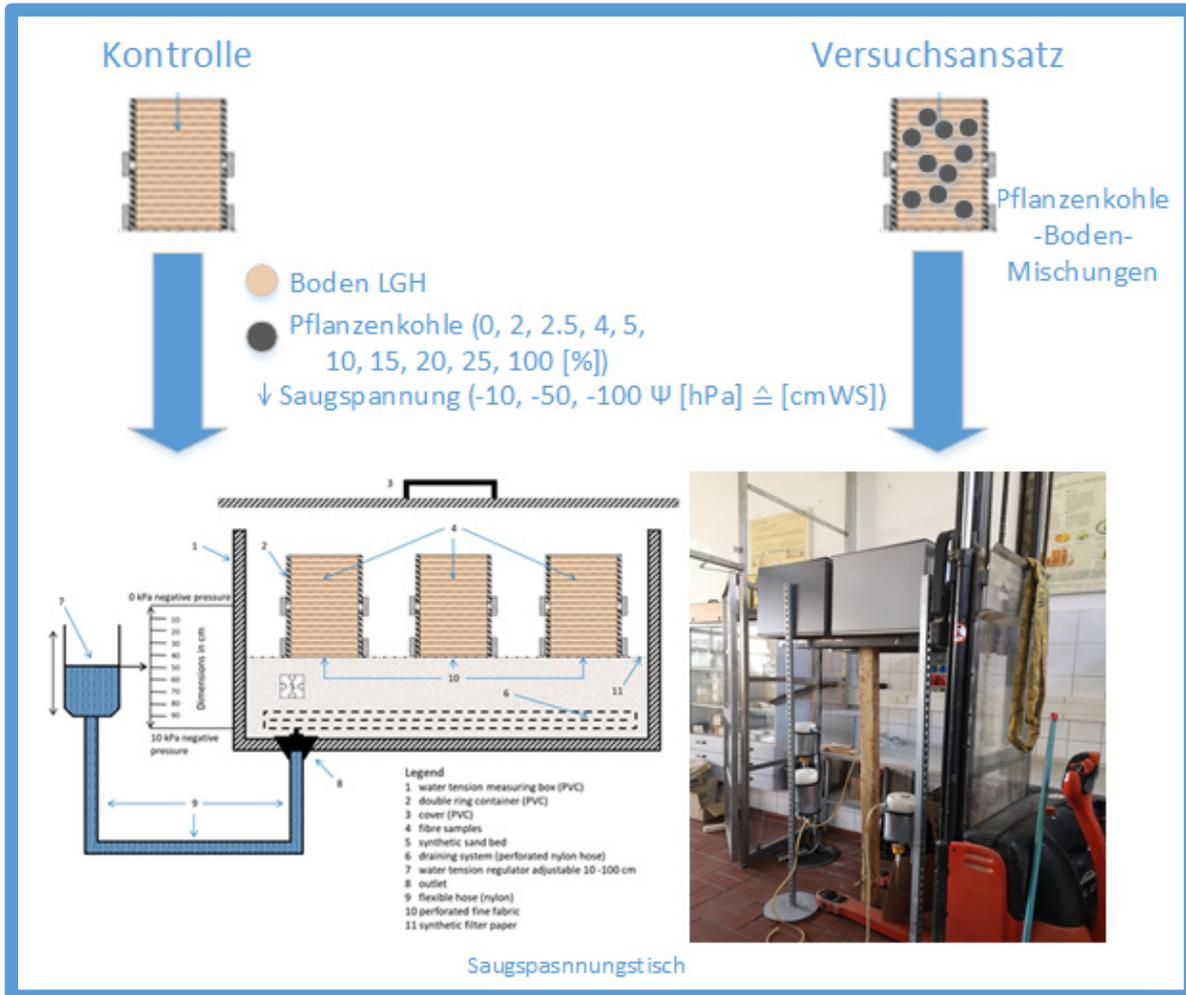


Abbildung 37: Versuchsschema zu Wasserhaltekapazitätsbestimmung unterschiedlicher Boden-Pflanzenkohlemischungen nach DIN EN 13041.

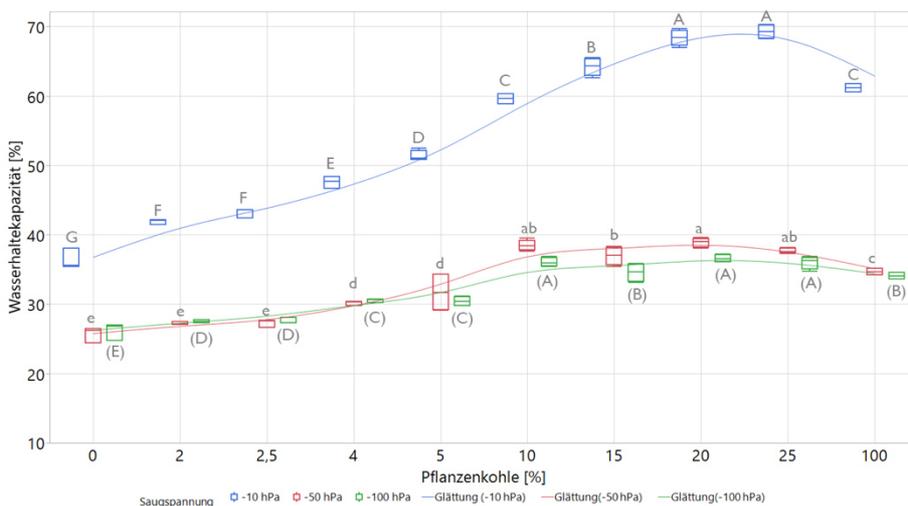


Abbildung 36: Wasserhaltekapazität in [%] des Bodenvolumens (entnommen beim LGH) in Abhängigkeit der Pflanzenkohlemenge für unterschiedliche Saugspannungen (-10, -50, -100 hPa) entsprechende der Bodentiefen 10, 50, 100 cm

Bei einer Saugspannung von -10 und -100 hPa führt jede Beimengung von Pflanzenkohle zu einer signifikanten Erhöhung der Wasserhaltekapazität. Bei einer Saugspannung von -50 hPa trat dies ab 4 % Kohlebeimengung ein. Für alle 3 Saugspannungen ist festzustellen, dass nicht die 100 % PK-Probe die jeweils höchste Wasserhaltekapazität erbringt, sondern immer deren

Mischung mit Boden (-10 hPa: 20 & 25% PK-Anteil; -50 hPa sowie -100 hPa: 10, 20 & 25% PK-Anteil). Der Grund hierfür liegt darin, dass die PK an sich schon eine recht hohe Wasserhaltekapazität aufweist. Allerdings ist die Pflanzenkohle deutlich grobpartikulärer als der Boden (Abbildung 9), was auch dazu führen kann, dass die Hohlräume zwischen den Partikeln zu groß werden, um das Wasser darin zu halten. Erst das Füllen dieser ineffektiven Räume mit dem feinkörnigeren Boden ermöglicht die Wasserhaltung dieser ungenutzten Räume durch die Schaffung der dafür notwendigen physikalischen Gegebenheiten.

5.1.4.4 Anwendung der Pflanzenkohle im Feldversuch

Erste Feldversuche mit PK auf einem Mais-Schlag des LGH im Jahr 2019 erbrachten keine verwertbaren Ergebnisse. Aufgrund hoher Trockenheit im Sommer gab es eine insgesamt schlechte Ernte und die Erträge auf den unterschiedlich gedüngten Streifen konnte nicht erfasst werden.

Im Jahr 2021 wurden Feldversuche auf zwei Roggen- und einem Sonnenblumenschlag des LGH durchgeführt. Auf den drei Ackerflächen (Bodenzahl <25) wurden jeweils 3 Flächen mit jeweils 3 Varianten zu ca. 100 m² angelegt (also 9 Testflächen je Ackerfläche). Die Varianten waren Kontrollfläche ohne organische Düngung, organische Düngung mit 21 m³ Fugat/ha und organische Düngung + PK mit 21 m³ Fugat/ha + 21 m³ PK/ha.

Für Roggen wurde in den Arealen mit PK-Ausbringung gegenüber der Kontrolle leichte Ertragsverbesserungen erreicht, die sich jedoch nicht signifikant von den Arealen mit ausschließlich organischer Düngung unterschieden. Für die Sonnenblumen waren keine Ertragsunterschiede erkennbar.

Tabelle 28: Ernteerträge der Probeflächen an den Standorten Dobbrikower Berge und Berkenbrücker Berge im Jahr 2021.

	Parzelle	Düngung	L/100 m ²	gKö/Bund	dt/ha		dt/ha	max %	min %
Dobbrikower Berge	1	Kohle+Fugat	420	272,8	13,6	MW	14,8	103,7	98,7
	2	Fugat	210	272,6	13,6	MW	15,0	105,1	100
	3	Null		270,6	13,5	MW	14,3	100	
	4	Kohle+Fugat	420	303,7	15,2				
	5	Fugat	210	296,4	15,8	ges.MW	14,7		
	6	Null		290,4	14,5				
	7	Kohle+Fugat	420	312,1	15,6				
	8	Fugat	210	312,0	15,6				
	9	Null		296,3	14,8				
			ca. 180 Halme/m ²						
Berkenbrücker Berge	1	Kohle+Fugat	420	338,3	16,9	MW	17,3	104,7	100,3
	2	Fugat	210	336,3	16,8	MW	17,2	104,3	100
	3	Null		320,9	16,0	MW	16,5	100	
	4	Kohle+Fugat	420	343,8	17,2				
	5	Fugat	210	344,1	17,2	ges.MW	17,0		
	6	Null		333,6	16,7				
	7	Kohle+Fugat	420	355,6	17,8				
	8	Fugat	210	353,7	17,7				
	9	Null		336,7	16,8				
			ca. 200 Halme/m ²						

Im Jahr 2022 wurden die Versuche fortgeführt. Dabei gab es folgende Fruchtwechsel:

- Dobbrikower Berge Mais nach Roggen
- Berkenbrück Roggen auf Roggen
- Elsholz Roggen nach Sonnenblumen angebaut.

Die extreme Trockenheit, bereits über die Wintermonate, führte zu einem mehr oder weniger Totalausfall der drei Schläge. Die ausgebrachte Pflanzenkohle war zu kurz im Boden, um eine positive Wirkung entfalten zu können. Somit war auch auf den Untersuchungsflächen kein verbesserter Aufwuchs bestimmbar.

2022 wurden außerdem Bodenproben auf ihre Nährstoffgehalte analysiert. Auf den gleichen Feldern wurden bereits 2019 und zum Teil 2018 Bodenproben genommen (Abbildung 38: Gehalte an P, K, Mg und Humus auf den Untersuchungsflächen des LGH. Ix sind die Proben von Elsholz, IIx sind die Proben von Berkenbrück und IIIx sind die Proben von Dobbrikow. Die Proben II13 und II14 sind von 02/2018, I7, I8, I9, II1, II2, II3, III4, III5, III6 sind von 05/19, alle anderen Proben sind von 09/22.).

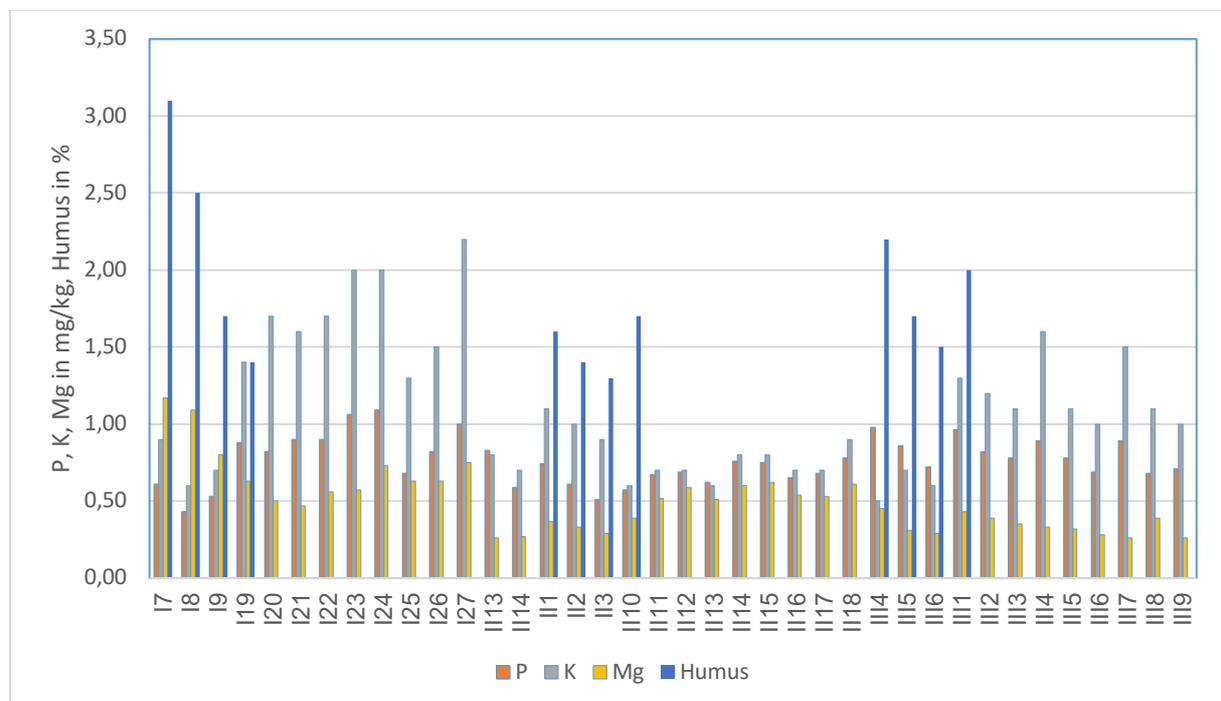


Abbildung 38: Gehalte an P, K, Mg und Humus auf den Untersuchungsflächen des LGH. Ix sind die Proben von Elsholz, IIx sind die Proben von Berkenbrück und IIIx sind die Proben von Dobbrikow. Die Proben II13 und II14 sind von 02/2018, I7, I8, I9, II1, II2, II3, III4, III5, III6 sind von 05/19, alle anderen Proben sind von 09/22.

Auf den Flächen I7, I8, I9 wurde 2019 PK ausgebracht. Auffällig ist hier, dass von allen Untersuchungen hier die höchsten Humus- und Mg-Gehalte bestimmt wurden. Die gleichen Flächen sind dann 2022 als I19, I23 und I27 wieder erfasst. Der Humusgehalt von I19 hat deutlich abgenommen. Auch die anderen Gehalte sind wieder auf ein vergleichbares Niveau zu den anderen Flächen gesunken. Lediglich I27 hat weiterhin einen hohen Mg-Gehalt und auch die Gehalte an P und K sind relativ hoch im Vergleich zu den Vergleichsflächen.

5.1.4.5 Wirtschaftliche Aspekte der PK-Produktion und -Anwendung

Die Wirtschaftlichkeit der PK-Produktion und -Anwendung ergibt sich zum einen in Hinblick auf den Vergleich zum Handelspreis für PK und beim Einsatz von PK im Stall im Vergleich zu Stroh als Einstreu. Bei entsprechender Automatisierung ergibt sich ein Anschaffungspreis von ca. 395.000 € und wird über 10 Jahre abgeschrieben. Durch die Automatisierung wäre ein 16-stündiger Betrieb an 310 Tagen im Jahr machbar. Dadurch ergeben sich 1.653 Ladungen pro Jahr. Das im Jahr erzeugte PK-Volumen beträgt 1.091 m³/a oder 136 t/a absolut trockene bzw. 170 t/a PK mit 20 % Restfeuchte. Die Herstellungskosten unter diesen Annahmen betragen 92 €/m³ PK. Der Abgabepreis für kontrollierte, die EBC Laborwerte erfüllende Pflanzenkohle liegt bei etwa 250 €/m³.

700 L PK ersetzen 1 t Stroh, welches in der Selbstbergung mit Kosten von 100 €/t angesetzt werden kann. Die 700 L PK liegen mit 64,40 € deutlich niedriger als die äquivalente Strohmenge. Hinzu kommt, dass das Entmistungsintervall von 4 auf 5 Wochen verlängert wird. Statt einer Einstreumenge von 6,5 t Stroh für 4 Wochen, werden 2 t Stroh und 3.150 L PK (dies erfüllt auch die Forderung von 5 % PK im Mist) für einen Zeitraum von 5 Wochen eingestreut. Die Jahreskosten bei 100 % Stroheinstreu liegen bei 8.450 €/a, bei Einstreu des Stroh-PK-Gemischs liegen diese bei 5.094 €/a und somit um fast 40 % niedriger.

Die Wirtschaftlichkeit der PK-Anwendung im Ackerbau ergibt sich aus dem Mehrerlös durch eine verbesserte Ernte und dem Erlös aus der CO₂-Speicherung im Boden im Vergleich zu den Kosten für die PK-Produktion und Ausbringung. Bei einer Ausbringung von 20 m³/ha – entsprechend 2,5 t/ha absolut trockene PK – betragen die Herstellungskosten 1.840 €/ha, die Ausbringungskosten können denen von Festmist gleichgesetzt werden und betragen 6 €/m³ oder 120 €/ha. Für die Fixierung von Kohlenstoff durch die PK-Einbringung können bei einem Zertifikatspreis von 80 €/t CO₂-Äq. mindestens 385 €/ha Erlös erzielt werden. Bei einer Wiederholung der PK-Ausbringung alle 20 Jahre muss ein Mehrertrag pro Jahr von 78,75 €/ha oder 2,5 bis 5 dt/ha Roggen oder 15 bis 20 dt/ha Silomais, also ein 5 bis 10 % höherer Ertrag, erzielt werden. Bei Fruchtarten mit höheren Hektarerlösen (Spargel, Gemüse, Obst) wird der Break-even bei geringeren Mehrerträgen erreicht.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

Trotz der anfänglichen Verzögerung bei der Installation des KonTiki konnte das Konzept in dieser Zeit deutlich weiterentwickelt werden. So zeigte sich, dass eine Brikettierung oder Pelletierung des Materials für die Pyrolyse nicht nur nicht notwendig, sondern sogar kontraproduktiv ist. Weiterhin konnte durch die Arbeit am KonTiki-Prinzip hin zum Carbon Twister® dieses so weit entwickelt werden, dass unser Ziel einer Pyrolyse mit 30 % Gärrest und 70 % Holzhackschnitzeln bei weitem übertroffen wurde und wir in der Lage sind, 100 % Gärrest und viele weitere Materialien zu pyrolysieren. Entscheidend für die Pyrolyse ist, dass das Material gut getrocknet ist und einen maximalen Wassergehalt von 25 % am besten von 20 % hat. In der Zusammenarbeit mit dem ATB und der Universität Erlangen, konnte weiterhin erreicht werden, dass die Pyrolyse mit dem Carbon Twister® emissionsarm und unter Einhaltung aller Grenzwerte betrieben wird. Durch die enge Zusammenarbeit mit dem LGH wurde außerdem eine robuste, für die Landwirtschaft geeignete Anlage geschaffen.

Die späte Installation der Pyrolyse, aber auch weiteren Störungen des Betriebs durch notwendige Umbauten, Lieferverzögerungen von Bauteilen während der Corona-Krise und krankheitsbedingten Verzögerungen in dieser Zeit war die Produktion der Pflanzenkohle und folglich auch die Nutzung bei den beteiligten Betrieben eingeschränkt. So wurden die Stallversuche bei der AGT erst zum Projektende durchgeführt. Dies hatte Auswirkungen auf die Versuche, die im Stall und auf den Feldern durchgeführt werden konnten. Viele Ergebnisse stammen aus parallelen Laborversuchen.

Die Beimischung von PK in die Stalleinstreu hat viele positive und keine erkennbar negativen Auswirkungen auf die Tiere. Es gab keine zusätzlichen Verschmutzungen, die Tiere fühlten sich wohler und zeigten verbesserte Leistungsparameter. Neben den direkten Auswirkungen auf die Tiere, wurden die Treibhausgasemissionen aus Mist und Stall deutlich reduziert.

Die Laborversuche zur Anwendung von PK in Biogasanlagen ergaben klar, dass hierdurch der Prozess begünstigt und stabilisiert wird. Die Übertragung dieser Ergebnisse in die Praxisanlagen gestaltete sich schwieriger. Zum einen war der Eintrag von PK in die Biogasanlage des LGH sehr niedrig, lediglich in einem Teilstall wurde Mist mit PK versetzt, und die Fütterung der Anlage ist in der Praxis nicht so stabil wie im Labor. Nichtsdestotrotz scheint sich der Anlagenbetrieb stabilisiert zu haben und nach einer Havarie bedingten Entleerung des Fermenters konnte dieser sehr schnell wieder auf volle Leistung gebracht werden.

Die Anwendung von PK auf dem Feld war durch die vorherrschenden Witterungsverhältnisse, trockene Sommer nach trockenen Wintern, extrem gestört. Im ersten Jahr der Anwendung mit Silomais beim LGH war der Ertrag so spärlich, dass eine Auswertung der unterschiedlichen Flächen nicht möglich war. 2020 war dann nicht ausreichend PK vorhanden und 2022 waren die Erträge wieder nicht auswertbar. Aber die Versuche im Jahr 2021 ergaben zumindest eine leichte Verbesserung des Ertrags für mit PK und Gärrest behandelte Fläche gegenüber der Kontrolle. Die mit Gärrest behandelte Fläche erbrachte jedoch etwa die gleiche Steigerung, wobei hier wahrscheinlich mehr Nährstoffe als auf der mit PK behandelten Fläche ausgebracht wurden. In den parallelen Laborversuchen waren die Ergebnisse eindeutiger. Schon mit geringen PK-Beimischungen von 2,5 bis 5 % wurden positive Effekte auf Wurzelwachstum, Wachstum des Grünanteils der Pflanzen und die Wasserhaltekapazität des Bodens erreicht. Bei größeren PK-Beimischungen waren diese Effekte, außer unter sehr guten Bedingungen, nicht immer so eindeutig. Andererseits ist eine Beimischung von 2,5 % unter Feldbedingungen schon eine Herausforderung, was die einzusetzende Menge von PK betrifft. Hier sind Werte von etwa 1 % PK in den obersten Zentimetern des Bodens eher realistisch.

Die Anwendung der Pflanzenkohle im Stall hat klare wirtschaftliche Vorteile. So können die Strohmenge deutlich und folglich die Kosten für die Einstreu um 40 % reduziert werden. Auf kurze Sicht weniger vorteilhaft erscheint die Anwendung der Pflanzenkohle auf dem Feld. Hier schlagen erhebliche Kosten für die zu produzierende Menge PK pro Hektar zu Buche. Dem kann jedoch durch eine sehr lange Spanne von 20 Jahren bis zur nächsten Anwendung begegnet werden. Außerdem könnte eine zu erwartende Erhöhung der Erlöse für CO₂-Zertifikate die Wirtschaftlichkeit in der Zukunft verbessern.

5.3 Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

Pflanzenkohle erfüllt die zu Projektbeginn gesetzten Erwartungen:

- PK ist als Stalleinstreu geeignet und kann einen Teil des Strohs ersetzen
- PK in der Einstreu wirkt sich positiv und auf keinen Fall negativ auf die Tiere aus
- PK, in den möglichen Konzentrationen, hat keine negative Auswirkung auf die Biogasanlage, sondern wirkt sich zumindest stabilisierend aus
- PK verbessert die Bodeneigenschaften und folglich die Pflanzenproduktion
- PK trägt offensichtlich zur Reduktion von Treibhausgasemissionen aus der Landwirtschaft bei
- PK lässt sich wirtschaftlich produzieren und verbessert die Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaft

5.4 Beitrag der Ergebnisse zu förderpolitischen EIP-Zielen

Die Ergebnisse des Projekts haben dazu beigetragen, innovative Lösungen zur Verbesserung des Tier- und Klimaschutzes in der Tierhaltung und dem Ackerbau bereitzustellen. Es werden Wege zur Umsetzung der Ergebnisse des Projekts in die Praxis aufgezeigt.

5.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis

Die Produktion und der Einsatz von Pflanzenkohle ist für die Landwirtschaft praktikabel. Die genutzte und weiterentwickelte Pyrolyseanlage ist für die landwirtschaftliche Praxis tauglich. Separierter, getrockneter Gärrest ist neben vielen anderen potenziellen Einsatzstoffen für die Pyrolyse geeignet. Die selbst produzierte Pflanzenkohle ersetzt Stroh in der Einstreu von Rinderställen und verbessert das Stallklima und folglich das Tierwohl. Pflanzenkohle verbessert die Bodeneigenschaften und fördert somit das Pflanzenwachstum und die Wasserhaltekapazität des Bodens. Die Produktion der Pflanzenkohle kann wirtschaftlich umgesetzt werden und der Einsatz der Pflanzenkohle verbessert die Wirtschaftlichkeit im Einsatzbereich.

5.6 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

Die ursprünglich geplanten Ziele konnten nur zum Teil erreicht werden. Insbesondere die Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse aus einem Betrieb auf die anderen beteiligten Betriebe war durch starke Verzögerungen geprägt. So konnte die zentrale Aufgabe der Produktion der Pflanzenkohle und daraus die Verteilung auf die anderen Betriebe nur eingeschränkt durchgeführt werden. Zum einen waren finanzielle und technische Probleme zu lösen, weiterhin wurden einige zentrale Arbeiten durch die Corona-Krise verzögert und schließlich leiden die beteiligten Agrarbetriebe immer stärker unter Personalmangel, wodurch notwendige und geplante Arbeiten immer wieder verschoben werden mussten.

5.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit und weiterführende Fragestellungen

In diesem Projekt wurden vorrangig die Eignung von Gärrest als Ausgangsstoff zur Pflanzenkohleherstellung und die grundsätzliche Eignung des Produkts in den Anwendungen Stall und Bodenverbesserung betrachtet sowie die Verfahren hierzu im Grundsatz entwickelt. Während dieser Zeit wurde die Forschung zur Pflanzenkohle intensiviert und ausgedehnt. Dabei konnte gezeigt werden, dass die Modifikation der Pflanzenkohle nach der Pyrolyse zu Produkten

führen kann, die für spezifische Anwendungen besser geeignet sind. Diese Erfahrung wurden auch in eigenen parallel stattfindenden Projekten bereits gemacht. Wir haben deshalb aus unserer Projektgruppe heraus 2 Projektanträge gestellt, die spezifisch geeignete Pflanzenkohlen für die Bodenverbesserung insbesondere im Ackerbau und für die Emissionsreduktion von Treibhausgasen im Stall und der anschließenden Ausbringung im Feld in den Mittelpunkt stellt.

Die Projektpartner konnten weiterhin einen umfangreichen Erkenntnis- und Erfahrungsschatz aufbauen, mit dem Landwirte zur Produktion und Anwendung von Pflanzenkohle umfassend beraten und angeleitet werden können. Es wurden robuste und einfach anzuwendende Verfahren entwickelt.

6 Zusammenarbeit der operationellen Gruppe

Die OG-Zusammenarbeit verlief zielführend. Es bestand ein reger Austausch zwischen den OG-Partnern, die eine direkte Zusammenarbeit in einzelnen Arbeitspaketen hatten. Während der Projekttreffen und den regelmäßig stattfindenden Video-Chats beteiligten sich alle OG-Partner rege an der Diskussion der bisher durchgeführten Arbeiten und Ergebnisse und gaben Anregungen zur Weiterentwicklung des Projekts. Die OG-Partner machten die Erfahrung, dass mit diesem Projekt viele Fragestellungen aufgeworfen wurden, die bisher so nicht erforscht und untersucht waren und wir somit viele neue Erkenntnisse über die eigentliche Fragestellung des Projekts hinweg gewannen. Es bestand allgemein das Gefühl, etwas Neues und Wichtiges, das große Anwendbarkeit in der Landwirtschaft haben kann, zu entwickeln und umzusetzen.

Neben den Verzögerungen durch Finanzierungs-, technischen, und Lieferproblemen gab es während des Projekts zwei Mutterschaften, die sich auf die Projektbearbeitung auswirkten. Außerdem wurde einmal mehr die Erfahrung gemacht, dass die Landwirtschaft auch auf ungeplante Gegebenheiten reagieren muss und dies und andere unvorhergesehenen Änderungen mit einem wissenschaftlichen Anspruch an Messungen und Beobachtungen nicht zusammenpassen.

Der ursprüngliche Projektpartner Agrar-KG Wittbrietzen und hier Herr Matthias Schmidt sah sich nicht in der Lage, die Versuche auf dem Betriebsgelände in Wittbrietzen durchzuführen. Im Ergebnis dessen hatte Herr Jürgen Frenzel seine Geschäftstätigkeit zum Landgut Hennickendorf GmbH in Dobbrikow verlegt und das Projekt wurde dort weitergeführt. Somit wurden alle bis dahin in Wittbrietzen gemachten Versuche in Dobbrikow wiederholt, um das Projekt sachgemäß weiterzuführen.

7 Kommunikations- und Disseminationskonzept

Die Organisation der Prozesse erfolgte normalerweise über Mail, Telefon und VideoChat, letzteres regelmäßig alle 2 Wochen. Außerdem gab es viele bilaterale Treffen bei den Betrieben zwischen dem Projektleiter und den Landwirten. Ein allgemeiner Austausch zwischen den Projektpartnern und auch den Vertreter*innen des Beratungsdienstleisters und die Vorstellung von Projektergebnissen erfolgte in 1-2 großen Projekttreffen pro Jahr, diese

während der Corona-Krise auch per Videochat. Redmine sollte als Austausch-Plattform für Dokumente und Datensätze dienen. Dies hat jedoch nur bedingt funktioniert.

Die Ergebnisse des Projekts wurden bei mehreren Veranstaltungen der Deutschen Vernetzungsstelle Ländliche Räume (DVS) zu EIP in Deutschland, einigen regionalen Veranstaltungen mit einem engen Bezug zur Landwirtschaft, der Jahrestagung 2022 des Fachverbands Pflanzenkohle mit vielen Teilnehmern aus der Praxis und in einer großen Abschlussveranstaltung mit ca. 20 externen Teilnehmern vorgestellt. Die Vorträge sind außerdem über unsere Internetseite (<https://www.b3-bornim.de/b3-projektbetreuung-2/>) abrufbar. Es ist geplant, die Ergebnisse auch weiterhin bei geeigneten Veranstaltungen vorzustellen.

Weiterhin gibt es bereits mehrere Artikel über das Projekt in Journalen, die sich insbesondere an Landwirte wenden. Aber auch wissenschaftliche Artikel in referierten Zeitschriften sind bereits veröffentlicht oder in Arbeit.

Literatur

Abdoun E., Weiland P., 2009. Optimierung der Monovergärung von nachwachsenden Rohstoffen durch Zugabe von Spurenelementen. Bornimer Agrartechnische Berichte, Heft 68, 69 – 78.

DIN, 2001. DIN EN 12880: 2001–02. Charakterisierung von Schlämmen – Bestimmung des Trockenrückstandes und des Wassergehalts. DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Deutschland.

Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe (FNR), 2016: Leitfaden Biogas. Von der Gewinnung zur Nutzung.

Sanchez, E., Herrmann, C., Werner, M., Borja, R., 2021. Effect of organic loading rate on the anaerobic digestion of swine waste with biochar addition. Environmental Science and Pollution Research, 29, 38455-38465.

Shi, X.S., Dong, J.J., Yu, J.H., Yin, H., Hu, S.M., Huang, S.X., Yuan, X.Z., 2017. Effect of Hydraulic Retention Time on Anaerobic Digestion of Wheat Straw in the Semicontinuous Continuous Stirred-Tank Reactors. BioMed Research International, Article ID 2457805, 6 pages. <https://doi.org/10.1155/2017/2457805>

Tedom-Schnell, 2021. <https://tedom-schnell.de/biogas/flexi>, abgerufen am 13.12.2021.

Stallkamp, 2022. Pressschneckenseparatoren, Produktblatt.

<https://www.stallkamp.de/produkte/separatoren/pressschnecken-separator>, abgerufen am 23.11.2022.

VDLUFA, 2012. Methodenbuch III – Die chemische Untersuchung von Futtermitteln, 3. Aufl., Gesamtwerk einschl. 1. – 8. Ergänzungslieferung 1983–2012, 1976–2012. VDLUFA-Verlag, Darmstadt, Deutschland.

Viger, M., Hancock, R.D., Miglietta, F., Taylor, G., 2015. More plant growth but less plant defence? First global gene expression data for plants grown in soil amended with biochar GCB Bioenergy - Wiley Online Library; <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcbb.12182>, abgerufen am 29.09.2023