

Abschlussbericht

zum Vorhaben

Bau einer PYREG® Anlage zur Klärschlammbehandlung auf der Kläranlage Linz-Unkel
KfW-A.: NKa3 003004

Zuwendungsempfänger/-in

Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel

Umweltbereich

Abwasser

Laufzeit des Vorhabens

14.02.2014 bis 30.09.2019

Autor/-en

Dagmar Stirba

Fachbereichsleiterin Finanzen, Tiefbau, Hochbau
Werkleiterin „Abwasser“ der Verbandsgemeinde Linz (bis 28.02.2023)

Michael Heumann

Fachbereichsleiter Tiefbau
Werkleiter „Abwasser“ der Verbandsgemeinde Linz (seit 01.03.2023)

Dr. Marianne Buchmüller

Leiterin Kalkulation der ELIQUO STULZ GmbH, Grafenhausen

Helmut Gerber

Geschäftsführer der PYREG® GmbH, Emmelshausen

**Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare
Sicherheit**

Datum der Erstellung

Die Ersterstellung des Berichtes erfolgte zum 30.09.2019. Aufgrund personeller Wechsel auf Seiten des Zuwendungsempfängers, sowie der laufenden Optimierungen im Projekt und der unterschiedlichen Bewertung der Rechtslage wurde der Bericht mehrfach grundlegend überarbeitet - zuletzt zum 08.12.2024. Daher sind trotz der Projektlaufzeit bis 30.09.2019 neuere Erkenntnisse ebenfalls enthalten.

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen KfW: Nka3003004	Projekt-Nr.: 3004
Titel des Vorhabens: Bau einer PYREG®-Anlage zur Klärschlammbehandlung	
Autor/-en (Vorname Name): Dagmar Stirba Michael Heumann Dr. Marianne Buchmüller Helmut Gerber	Vorhabenbeginn: 14.02.2014 Vorhabenende: 30.09.2019
Zuwendungsempfänger/-in (Name, Anschrift): Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel Am Schoppbüchel 5 53545 Linz am Rhein	Veröffentlichungsdatum: 03.02.2025 Seitenzahl: 93
Gefördert im BMU-Umweltinnovationsprogramm des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit	
Kurzfassung (max. 1.500 Zeichen): Ziel des Projektes war es, die Entsorgung des Klärschlammes der Kläranlage (KLA) Linz-Unkel langfristig und zukunftsorientiert sicherzustellen. Dies sollte durch die Installation einer thermischen Klärschlammbehandlungsanlage erreicht werden, bei der der Klärschlamm energieeffizient getrocknet und anschließend karbonisiert wird. Für die Karbonisierung wurde das PYREG® Verfahren vorgesehen. Beim PYREG® Verfahren soll der Klärschlamm, ähnlich wie bei einer Verbrennung, zur Energiegewinnung um Teile der Organik reduziert, weitestgehend hygienisiert und von organischen Schadstoffen entfrachtet werden; der im Karbonisat enthaltenen Phosphor soll jedoch pflanzenverfügbar, sowie Restgehalte an Organik zur Bodenverbesserung enthalten bleiben. Im Zuge der Umsetzung erfolgte im Wesentlichen der Ersatz der vorhandenen Kammerfilterpresse durch eine Schneckenpresse, die Implementation eines Niedertemperatur-Bandrockners für die Schlamm-trocknung, sowie der Karbonisierungsanlage. Im Projektverlauf traten verfahrenstechnische Schwierigkeiten auf, hier v.a. die Betriebszeiten der PYREG®-Anlage, die bis zum Projektende nicht behoben werden konnten. Wesentlich beeinflusst wurde das Projekt durch die juristische Feststellung, dass Karbonisat in Deutschland aktuell kein zugelassenes Düngemittel darstellt und somit als Abfall zu entsorgen ist, wodurch die Wirtschaftlichkeit negativ beeinflusst wird. Weitere negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit entstanden durch die Energiekostensteigerung v.a. durch die Ukraine-Krise ab Feb. 2022 und Abweichungen zwischen geplanter und realer Energiebilanz der zentralen Anlagenkomponenten. Daher wurde die Anlage 2022/23 außer Betrieb genommen.	
Schlagwörter: Thermische Klärschlammbehandlung, Klärschlamm-entsorgung, Klärschlamm-trocknung, Klärschlammkarbonisierung, Klärschlammkarbonisat, Phosphor-Rückgewinnung	
Anzahl der gelieferten Berichte Papierform: xxx Elektronischer Datenträger: xxx	Sonstige Medien: xxx Veröffentlichung im Internet geplant auf der Webseite: xxx

Report Coversheet

File number KfW: NKa3003004	Project No.: 3004
Title of the project: Construction of a PYREG® plant for sewage sludge treatment	
Author/Authors (First Name, Family Name): Dagmar Stirba Michael Heumann Dr. Marianne Buchmüller Helmut Gerber	Start of project: 14/02/2014 End of project: 30/09/2019
Beneficiary (name, address): Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel Am Schoppbüchel 5 53545 Linz am Rhein	Date of publication: 03/02/2025 No. of Pages: 93
Funded by the Environmental Innovation Programme of the Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety	
<p>Abstract (max. 1,500 characters):</p> <p>Goal of the project was to secure the sewage sludge disposal of the wastewater treatment plant (wwtp) Linz-Unkel long-term and future-oriented. This should be achieved by thermal sludge treatment based on energy-efficient sewage sludge drying and subsequent sludge carbonization. For sludge carbonization, the PYREG® process was installed. With PYREG® process, similar to sludge incineration, parts of the organic content of the sludge should be reduced for energy capture, the sludge should be hygienised and organic pollutants should be to the greatest possible extend removed; however, the phosphorus which remains in the carbonisate should be plant-available and the residual content of the organic content should be used as soil conditioner.</p> <p>The most important steps for the realization of the project were the replacement of the existing chamber filter press by a screw press and the installation of a low-temperature belt dryer for sludge drying as well as the installation of the carbonization plant.</p> <p>In the course of the project some technical difficulties appeared, especially the hours of operation of the PYREG® plant, which couldn't be eliminated till the end of the project. The project became essentially affected by the juristic statement, that carbonisate in Germany isn't admitted as fertilizer and has to be depolluted as waste, which affected the economy negative. Further negative impacts developed from the increase of energy costs especially of course the Ukraine war in feb 2022, and of the divergence from the intended and the real energy footprint of central plant components. Therefore, the plant was shut down in 2022/23.</p>	
<p><u>Keywords:</u></p> <p>Thermal Sewage Sludge Treatment, Sewage Sludge Disposal, Sewage Sludge Drying, Sewage Sludge Carbonization, Sewage Sludge Carbonisate, Phosphorus-Recovery</p>	
<p>Number of reports delivered</p> <p>Paper form: xxx</p> <p>Electronic data carrier: xxx</p>	<p>Other media: xxx</p> <p>Publication on the Internet planned on the website: xxx</p>

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	11
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und der Projektpartner	11
1.2. Ausgangssituation	12
2. Vorhabenumsetzung.....	14
2.1. Ziel des Vorhabens.....	14
2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	17
2.2.1 Klärschlamm entwässerung	18
2.2.2 Klärschlamm trocknung	20
2.2.3 Klärschlamm karbonisierung.....	25
2.2.4 Anlagensteuerung	28
2.2.5 Anlagenaufstellung.....	29
2.3. Umsetzung des Vorhabens	29
2.3.1. Anlagendurchsatz	30
2.3.2. Wärmeversorgung.....	33
2.3.3 Abluft- und Abgasemissionen	37
2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	43
2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	45
2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms.....	46
2.6.1 Massenbilanz für Klärschlamm und Asche.....	46
2.6.2 Energiebilanz der Klärschlammbehandlung, inklusive Trocknung und thermischer Behandlung im PYREG®-Reaktor	50
2.6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	59
2.6.4 Zusammensetzung und Qualität (insbesondere Pflanzenverfügbarkeit, Schwermetallgehalte) des als Klärschlamm asche bezeichneten Verfahrensrück- standes und des entstehenden Düngemittels	61
2.6.5 Nachweis der Asche- und P-Verwertung	68
3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung.....	71
3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung	71
3.2. Stoff- und Energiebilanz.....	75

3.3. Umweltbilanz	76
3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse	78
3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren	80
4. Übertragbarkeit	84
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung	84
4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit	85
5. Zusammenfassung / Summary	88
6. Literatur	92
7. Anhang	93

Abkürzungen

a	Jahr
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
AbfKlärV	Abfallklärschlammverordnung / Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung
Bh	Betriebsstunde
BHKW	Blockheizkraftwerk
BImSchG	Bundesimmissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung / Verordnung zur Durchführung des BImSchG
CAL-P	Laktatlösliches P (Extraktion mit Calcium-Laktat-Acetat)
Cd	Cadmium
CO	Kohlenmonoxid
CO ₂	Kohlendioxid
DPP	Deutsche Phosphor-Plattform e.V.
DepV	Deponieverordnung / Verordnung über Deponien und Langzeitlager
DüMV	Düngemittelverordnung / Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln
EW	Einwohnerwert
FLOX®	Flammenlose Oxidation
FM	Frischmasse
GE _E	Europäische Geruchseinheit
Ges-C	In der Abluft: Messkomponente Gesamt-Kohlenstoff
g	Gramm
h	Stunde
HCl	In der Abluft: Messkomponente gasförmige, anorganische Chlorverbindungen
Hg	Quecksilber
H ₂ O	Wasser
HT	Hochtemperatur
ICP-OES	Inductively Coupled Plasma – Optical Emission Spectroscopy / Induktiv gekoppelte Plasma Emissions-Spektroskopie
i.M.	im Mittel
IUTA	Institut für Energie- und Umwelttechnik (Sitz: Duisburg)
K	Kelvin
kg	Kilogramm
kJ	Kilojoule
KLA	Kläranlage
KS	Klärschlamm
KSK	Klärschlammkarbonisat
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde
LBauO	Landesbauordnung des Landes Rheinland-Pfalz
LWG	Wassergesetz des Landes Rheinland-Pfalz (Landeswassergesetz)
LWL	Lichtwellenleiter

m ³	Kubikmeter
m ³ i. N., tr	Kubikmeter im Normzustand, trocken
mg	Milligramm
MJ	Mega-Joule
MVA	Müllverbrennungsanlage
n.b.	nicht bestimmt
n-AC-P	neutral-AmmonCitratlöslicher Phosphor
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO _x	Stickoxide
NO ₂	Stickstoffdioxid
N ₂ O	Distickstoffmonoxid
OS	Originalsubstanz
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
P	Phosphor
PCDD	Polychlorierte Dibenzodioxine
PCDF	Polychlorierte Dibenzofurane
PLS	Prozessleitsystem
PyCCS	Pyrogenic Carbon Capture and Storage
SGD Nord	Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord, Koblenz
SIL	Sicherheitsanforderungsstufe / Safety Integrity Level
t	Tonne
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TH	Technische Hochschule
TM	Trockenmasse
TR	Trockenrückstand
tr.	trocken
oTR	organischer Trockenrückstand
TSP	Triplesuperphosphat
UBA	Umweltbundesamt
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
Vol.%	Volumenprozent
WBD	Wissenschaftlicher Beirat für Düngefragen
WHC	Wasserhaltekapazität

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schema des geplanten Klärschlammbehandlungskonzeptes der KLA Linz-Unkel	16
Abb. 2: Prinzipschema der installierten Schlammentwässerung mit Schneckenpresse	19
Abb. 3: Foto der installierten Schneckenpresse IEA Typ SP-HF 05 XL.....	19
Abb. 4: Prinzip des Trockners EloDry®	20
Abb. 5: Schema der geplanten Einbindung der Anlagenkomponenten ins Wärmenetz der KLA.	22
Abb. 6: Foto des installierten Bandtrockners EloDry®	24
Abb. 7: Vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage	27
Abb. 8: Foto der PYREG®-Anlage mit dahinter eingebaute Entwässerungs- und Trocknungs- anlage	29
Abb. 9: Vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage nach Installation des Staubfilters	38
Abb. 10: Staubmesswerte aus dem Abgas der PYREG®-Anlage 2019.....	39
Abb. 11: Tatsächlich installierte wesentliche Anlagenkomponenten der Klärschlamm- behandlungsanlage beim Abschalten Ende des Jahres 2022	41
Abb. 12: Vergleich kalkulierte Stoff- und Wärmeströme geplant (oben) und nach Optimierung (unten).....	42
Abb. 13: Schema der Stoffströme der Klärschlammbehandlung.....	47
Abb. 14: Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018.....	52
Abb. 15: Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018.....	52
Abb. 16: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018.....	52
Abb. 17: Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019.....	53
Abb. 18: Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019.....	53
Abb. 19: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019.....	53

Abb. 20: Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019.....	54
Abb. 21: Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019.....	54
Abb. 22: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019.....	54
Abb. 23: Schema der Wärmeströme der Klärschlammbehandlung	56
Abb. 24: Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022.....	57
Abb. 25: Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 18.07 - 26.08.2022.....	57
Abb. 26: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022.....	57
Abb. 27: Schlammdurchsatz durch die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 11.8. - 13.08.2022.....	58
Abb. 28: Wärmeenergieeintrag in den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 11.08. - 13.08.2022.....	58
Abb. 29: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 11.08. - 13.08.2022.....	58
Abb. 30: Ertrag an Mais im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung	65
Abb. 31: P-Aufnahme des Maises im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung	65
Abb. 32: Ertrag an Weidelgras im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung	66
Abb. 33: P-Aufnahme des Weidelgrases im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung ...	66
Abb. 34: Laktatlöslicher Phosphor im Boden vor und nach dem Anbau von Mais	67
Abb. 35: Laktatlöslicher Phosphor im Boden nach dem ersten und zweiten Schnitt des Weidelgrases.....	67
Abb. 36: Massenbilanz und Vergleich der Inhaltstoffe von Klärschlamm (KS) und Klärschlammkarbonisat (K) und Bezug auf den Phosphat-Gehalt	76

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Genehmigungsrechtliche Anforderungen an die Trocknerabluft der KLA Linz-Unkel und Grenzwerte nach der TA-Luft	23
Tab. 2: Ergebnisse der Emissionsmessungen an der Trocknerabluft.....	37
Tab. 3: Massenbilanz für Klärschlamm / Klärschlammkarbonisat 2019	48
Tab. 4: Massenbilanz für Klärschlamm / Klärschlammkarbonisat 2020	49
Tab. 5: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsprognosen verschiedener Varianten der Behandlung des ausgefaulten Klärschlammes aus Planung 2014	60
Tab. 6: Vergleich der Wirtschaftlichkeitsprognosen von 2014 für die neue Klärschlammbehandlungsanlage mit den 2018 und 2021 ermittelten Kosten	61
Tab. 7: Chemische Kenngrößen der Phosphordünger	63
Tab. 8: Nährstoff- und Schwermetallgehalte der Phosphordünger	64
Tab. 9: Vergleich der wichtigsten Anlagenkenngrößen (Soll lt. Planung / Ist 2023).....	75
Tab. 10: Vermiedene CO ₂ -Emissionen durch Einlagerung von elementarem Kohlenstoff in das Klärschlammkarbonisat der KLA Linz-Unkel bei Verbringung in den Boden in der Projektphase	77
Tab. 11: LKW-Transporte bei Schlammfäulung und Entwässerung bzw. Schlammfäulung mit nachfolgender Entwässerung, Trocknung und Karbonisierung auf der KLA Linz-Unkel.....	78
Tab. 12: Gegenüberstellung wesentlicher Merkmale von KS-Karbonisierung und KS-Verbrennung	80

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und der Projektpartner

Das hier beschriebene Projekt wurde geplant und ausgeführt auf der Kläranlage (KLA) Linz-Unkel in Unkel.

Die Verbandsgemeinden Linz am Rhein und Unkel betreiben die KLA Linz-Unkel im Rahmen der Ihnen obliegenden Pflichtaufgabe der Abwasserbeseitigung für beide Verbandsgemeinden als gemeinsamer „Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel“.

Der Zweckverband ist für die Unterhaltung, die Instandsetzung, die Optimierung und den Betrieb der Kläranlage verantwortlich. Die entstehenden Kosten werden im investiven Bereich je hälftig von den beiden beteiligten Verbandsgemeindewerken getragen. Die laufenden Betriebskosten werden entsprechend eines aus den Schmutzfrachtmengen ermittelten Umlageschlüssels auf die beiden Verbandsgemeindewerke Linz und Unkel verteilt.

Die Zuständigkeit der Betriebsführung des „Zweckverbands Abwasserbeseitigung Linz-Unkel“ oblag während der Realisierung des Projekts den Verbandsgemeindewerken Abwasser Linz am Rhein. Auf der Kläranlage selbst sind permanent 4 Mitarbeiter beschäftigt.

Adressen:

Kläranlage Unkel
Am Bahndamm
53572 Unkel am Rhein

Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel
c/o Verbandsgemeindewerke Abwasser Linz am Rhein
Am Schoppbüchel 5
53545 Linz am Rhein

Sowohl die Konzeption, als auch die Betreuung während der Projektlaufzeit auf Seiten des Auftraggebers – Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel – erfolgte durch die Ingenieurgesellschaft Siekmann + Partner mbH, Thür.

Projektpartner:

PYREG GmbH, Dörth
Partner in einer Arbeitsgemeinschaft (ARGE) mit der ELIQUO STULZ GmbH bei der Realisierung des Vorhabens auf der Kläranlage Linz-Unkel
Verfahrensgeber sowie Hersteller, Lieferant und Systemintegrator der Karbonisierungsanlage

ELIQUO STULZ GmbH, Grafenhausen
ARGE-Partner der PYREG GmbH bei der Realisierung des Vorhabens auf der Kläranlage Linz-Unkel
Anlagenbauer mit Schwerpunkt im Bereich Abwasserbehandlung
Hersteller, Lieferant und Systemintegrator des Niedertemperatur-Bandrockners, sowie Lieferant und Systemintegrator aller weiteren Anlagenkomponenten

1.2. Ausgangssituation

Der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel betreibt seit 1993 zur Reinigung anfallender Abwässer der Verbandsgemeinden Linz und Unkel am Rhein die mechanisch-biologische Kläranlage Linz-Unkel mit einer Ausbaugröße von 28.800 Einwohnerwerten (EW).

Die biologische Reinigungsstufe war vor dem Umbau 2-straßig aufgebaut. Ursprünglich wurde der Schlamm aerob stabilisiert und nach statischer Voreindickung und Konditionierung mit Kalkmilch und Eisen-III-Chlorid über eine Kammerfilterpresse auf ca. 30 % Trockenrückstand (TR) entwässert. Der entwässerte Schlamm wurde landwirtschaftlich verwertet.

Bereits 2007 wurde vor dem Hintergrund steigender Energie- und Entsorgungskosten nach Optimierungsmöglichkeiten gesucht.

Im Sinne der Nachhaltigkeit wurden ab 2007 folgende Ziele verfolgt:

- die zukunftsorientierte Sicherstellung der Klärschlammverwertung;
- die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Verringerung der Betriebskosten;
- die langfristige Stabilisierung der Abwassergebühren;
- eine deutliche CO₂-Reduzierung.

Hierzu wurde durch die Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH eine Studie erstellt.

Diese beinhaltet als wesentliche Maßnahmen zur Erreichung der Ziele von 2007:

- a) die energetische Optimierung der Kläranlage durch die Erneuerung der Belüftungseinrichtung mit Plattenbelüftern der Firma Messner;
- b) die Verfahrensumstellung von der gemeinsamen aeroben Stabilisierung auf eine anaerobe Schlammstabilisierung (Faulung);
- c) die weitere Behandlung des Klärschlammes durch Trocknung und Karbonisierung.

Die Maßnahmen der Pos. a) und b) wurden in einem ersten Bauabschnitt in 2011 umgesetzt. Die Faulung wurde als 2-stufige Kompaktfaulung mit je 500 m³ Faulraumvolumen zur Behandlung von ca. 600 t Klärschlamm-Trockenmasse (TM) pro Jahr (a) mit 3 % TR im Schlamm realisiert. Zur Nutzung des Faulgases wird eine Mikrogasturbine zur Verstromung des aus der Faulung erzeugten Faulgases verwendet. Dieser Schritt war sowohl ökologisch, als auch ökonomisch sinnvoll, da die Energienutzung aus dem Faulgas der Klärschlammfaulungsanlage zur Betriebskostensenkung und somit zur Gebührenstabilität beiträgt.

In der jüngeren Vergangenheit war die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm zunehmend in die Diskussion geraten. Dies beruhte auf der Erkenntnis, dass mit dem Klärschlamm einerseits Schadstoffe - wie Schwermetalle, aber auch Mikroplastik und Spurenstoffe wie Hormone und Arzneimittelrückstände -, sowie Krankheitserreger - wie Salmonellen - in den Boden eingetragen werden können, diese Klärschlämme andererseits jedoch eine wesentliche Ressource für wichtige Boden-Nährstoffe wie Stickstoff und Phosphor

darstellen. Gleichzeitig häuften sich die Berichte, die vor der Endlichkeit der natürlichen Phosphor-Vorkommen warnen und anmahnen, dass mit dieser Ressource schonender und nachhaltiger umgegangen werden müsse.

Vor diesem Hintergrund postulierte die damalige Bundesregierung bereits im Koalitionsvertrag von 2013 das Ziel, die Klärschlammausbringung zu Düngezwecken zu beenden, aber Phosphor und andere Nährstoffe aus Klärschlamm zurückzugewinnen zu wollen. 2017 wurde dies mit der Novellierung der Klärschlammverordnung gesetzlich verankert. Die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung besteht hiernach ab 2029 für alle Kläranlagen, in denen der Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 20 Gramm (g) und mehr je Kilogramm (kg) Trockenmasse (TM) aufweist. Zudem ist die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm in der Landwirtschaft oder im Landschaftsbau anstelle einer Phosphorrückgewinnung ab 2029 bzw. 2032 nur noch Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von bis zu 100.000 (ab 2029) bzw. 50.000 (ab 2032) Einwohnerwerten (EW) gestattet.

Das vom Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel formulierte Ziel, zukunftsorientiert, entsorgungssicher und wirtschaftlich die Klärschlammmentsorgung sicherstellen zu wollen, führte folglich dazu, dass ein Klärschlammbehandlungsverfahren angestrebt wurde, das es erlaubt, den Klärschlamm auf der Kläranlage wirtschaftlich bereits so aufzubereiten, dass

- a) der im Klärschlamm enthaltene Phosphor nach der Aufbereitung pflanzenverfügbar vorliegt und
- b) das aufbereitete Material den Anforderungen der Düngemittelverordnung entspricht, so dass der derart aufbereitete Klärschlamm direkt als Düngemittel oder als Düngemittelausgangsstoff eingesetzt werden kann.

2. Vorhabenumsetzung

2.1. Ziel des Vorhabens

Bei der Planung der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel durch die Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH war zunächst vorgesehen, künftig nicht nur den Überschussschlamm der KLA Linz-Unkel, sondern auch den der KLA Hallerbach (ca. 10.000 EW) und der KLA Brochenbach (ca. 2.000 EW) auf der KLA Linz-Unkel anzunehmen, gemeinsam mit dem Überschussschlamm der KLA Linz-Unkel auszufaulen und weiter zu behandeln. Die Überschussschlämme der KLA Hallerbach und der KLA Brochenbach sollten hierfür auf ca. 6 % TR vorentwässert auf der KLA Linz-Unkel angeliefert werden.

Insgesamt sollte der Faulturm der KLA Linz-Unkel mit einer Fracht von total 775,5 t TM/a beschickt werden:

KLA Linz-Unkel:	600 t TM/a
KLA Hallerbach:	140 t TM/a
KLA Brochenbach:	37,5 t TM/a
= Eintrag in den Faulturm, total:	775,5 t TM/a

Das Konzept der künftigen Klärschlammbehandlung sah die folgenden Verfahrensschritte vor:

- **Klärschlammmentwässerung:**

Die Klärschlammmentwässerung sollte künftig nicht mehr mit der auf der KLA vorhandenen Kammerfilterpresse erfolgen, sondern mit Hilfe einer neu zu installierenden Siebbandpresse.

Eine Siebbandpresse ermöglicht die kontinuierliche Schlammmentwässerung, wohingegen die Schlammmentwässerung bei einer Kammerfilterpresse batchweise erfolgt.

- **Klärschlamm-trocknung:**

Der entwässerte Klärschlamm sollte über einen Niedertemperatur-Bandrockner so weitgehend getrocknet werden, dass die nachfolgende thermische Klärschlamm-Verwertung autotherm erfolgen kann.

- **Klärschlammkarbonisierung:**

Das Kernstück des geplanten Konzepts sollte die thermische Klärschlammbehandlung in Form der Klärschlammkarbonisierung darstellen.

Bei der hier geplanten Klärschlammkarbonisierung sollte der getrocknete Klärschlamm bei Temperaturen zwischen 550 und 650 °C karbonisiert werden. Dabei sollen Mikroplastik und ein Großteil der organischen Spurenstoffe aus dem Klärschlamm eliminiert und der Schlamm gleichzeitig von Quecksilber (Hg) und Cadmium (Cd) entfrachtet werden. Darüber hinaus sollte der im Endprodukt des Prozesses (Karbonisat) enthaltene Phosphor pflanzenverfügbar sein. Die Pflanzenverfügbarkeit des im Karbonisat enthaltenen Phosphors wurde neben dem Restgehalt an Kohlenstoff als wesentliches Unterscheidungsmerkmal zur Klärschlammverbrennungsgasche aus einer

thermischen Klärschlammbehandlung deklariert.

Klärschlammkarbonisat schien somit grundsätzlich geeignet als landwirtschaftlicher Dünger eingesetzt zu werden. Für die Nutzbarmachung sollte es lediglich einer mechanischen Aufbereitung (mahlen) des Karbonisats bedürfen, sofern zwei zusätzliche Voraussetzungen erfüllt würden:

1. *Das Klärschlammkarbonisat enthält nicht nur pflanzenverfügbaren Phosphor, sondern erfüllt auch alle weiteren Anforderungen der Düngemittelverordnung.* Je nach Beschaffenheit des der KLA zufließenden Abwassers kann insbesondere die Einhaltung der Grenzwerte von Schwermetallen wie Nickel (Ni) und Kupfer (Cu), die sich bei der Karbonisierung im Karbonisat aufkonzentrieren, schwierig sein. Dies wurde für die KLA Linz-Unkel im Vorfeld des geplanten Projektes geprüft. Aufgrund des Ergebnisses der Prüfungen wurde davon ausgegangen, dass das Klärschlammkarbonisat der KLA Linz-Unkel den Anforderungen der Düngemittelverordnung entspricht.
2. *Die Gesetzgebung erlaubt den Einsatz von Klärschlammkarbonisat als landwirtschaftlichen Dünger oder als Ausgangsstoff zur Herstellung von Düngemitteln zur bodenbezogenen Verwertung.* Das war bei Projektstart nicht der Fall und ist es auch nach aktueller Gesetzeslage nicht. Die Chancen dafür, dass diese Voraussetzung in wenigen Jahren zutreffen würde, wurden allerdings zum damaligen Zeitpunkt von der Betriebsleitung der KLA Linz-Unkel, dem Planungsbüro und (nach Vergabe des Auftrags) dem Projektpartner PYREG GmbH auch aufgrund von Gesprächen mit Vertretern weiterer Behörden als realisierbar eingeschätzt. Bis heute (12/2024) fehlt diese Erlaubnis, was einer der Gründe dafür ist, dass die Anlage im Jahr 2022/23 außer Betrieb genommen wurde (vgl. Kap. 3.1).

Für die Klärschlammkarbonisierung muss neben der Klärschlammmentwässerung, auch eine Klärschlamm Trocknung auf ≥ 85 % TR realisiert werden. Bei der thermischen Behandlung des getrockneten Klärschlammes in der Karbonisierungsanlage wird Wärme zurückgewonnen, die auf der KLA Linz-Unkel zusammen mit der Wärme, die bei der Verstromung des Faulgases in der Mikrogasturbine entsteht, für die Trocknung des Klärschlammes verwendet werden sollte. Ergänzend stand auf der KLA zusätzlich ein mit Erdgas betriebener Not-Heizkessel zur Verfügung.

Karbonisierungsanlage und Trockner sollten kontinuierlich betrieben werden. Das war der wesentliche Grund für die Entscheidung, die vorhandene Kammerfilterpresse gegen ein Entwässerungsaggregat auszutauschen, das den Klärschlamm kontinuierlich entwässert.

Aufgrund des benötigten Trocknungsgrades (≥ 85 % TR) und des für die Trocknung verfügbaren Wärmeniveaus (Niedertemperatur, d.h. Wärme in Form von Heißwasser von < 100 °C) wurde für die Klärschlamm Trocknung ein Niedertemperatur-Bandrockner ausgewählt. Außerdem

spielte die Anlagensicherheit eine Rolle: Im Gegensatz zu anderen Trocknern, z.B. Dünnschicht- oder Scheibentrocknern, muss bei Bandtrocknern im Normalbetrieb nicht mit dem Auftreten einer gefährlichen explosiven Atmosphäre aufgrund von Staub gerechnet werden. Der getrocknete Klärschlamm erfährt aufgrund der geringen Bandgeschwindigkeit des Trockners und der geringen Luftgeschwindigkeiten wenig Abrieb und wird zudem indirekt mit dem Heißwasser beheizt.

Das für die KLA Linz-Unkel geplante neue Klärschlammbehandlungskonzept ist in der Abbildung im Anhang 1, sowie schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

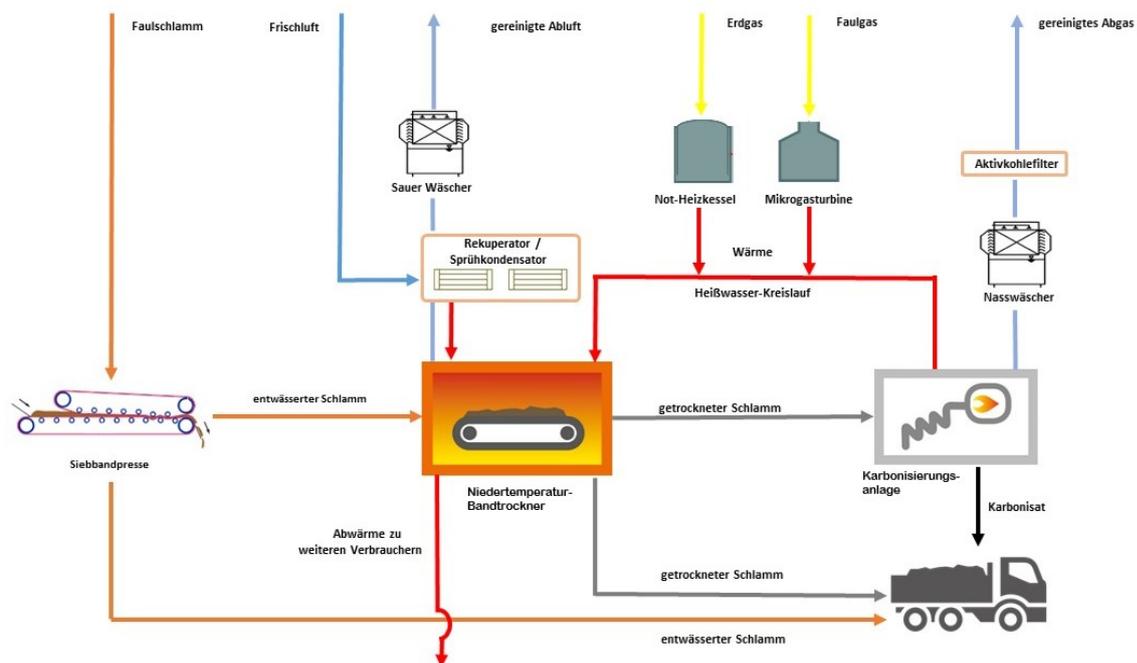


Abb. 1: Schema des geplanten Klärschlammbehandlungskonzeptes der KLA Linz-Unkel

Mit dem geplanten Klärschlammbehandlungskonzept sollten folgende konkrete Vorhabensziele erreicht werden:

- Die Ressource Klärschlamm sollte auf der KLA in ein Material mit pflanzenverfügbarem Phosphor umgewandelt werden, das direkt als Düngemittel oder Düngemittelausgangsstoff eingesetzt werden kann.
- Das Verfahren sollte wirtschaftlich sein,
 - weil der Schlamm während der Karbonisierung energetisch optimal ausgenutzt und die dabei entstehende, kostengünstige Wärme und weitere, auf der Kläranlage bereits vorhandene, aber bislang nicht genutzte Wärme im Verfahren genutzt wird,
 - weil der entwässerte Schlamm durch das geplante Klärschlammbehandlungskonzept eine Massereduktion von ca. 80 % erfährt, was die Transportkosten reduziert und sich außerdem positiv auf die CO₂-Bilanz auswirkt und

- weil davon ausgegangen wurde, dass das Karbonisat zumindest kostenlos in die Landwirtschaft oder an Düngemittelhersteller abgegeben werden könne, d.h. keine Entsorgungskosten hierfür anfallen würden. Man nahm an, dass auf längere Sicht gesehen vielleicht sogar Erlöse durch den Verkauf des Karbonisats generiert werden könnten.

Bei dem geplanten Projekt für die KLA Linz-Unkel handelte es sich um eine erstmalige und modellhafte großtechnische Umsetzung. Es sollte zum ersten Mal eine Karbonisierungsanlage der Firma PYREG GmbH in eine Kläranlage in Deutschland integriert und im periodischen Betrieb über ca. 4 Tage zur thermischen Behandlung von Klärschlamm eingesetzt werden. Bis dato wurden Anlagen der Firma PYREG GmbH ausschließlich zur Herstellung von Pflanzenkohle aus Biomasse wie u.a. Grünschnitt oder Holzhackschnitzeln betrieben.

Zum Zeitpunkt der Planung des Projektes für die KLA Linz-Unkel waren lediglich PYREG®-Anlagen verfügbar, die die kontinuierliche Karbonisierung von maximal ca. 750 - 850 t Klärschlamm-TM/a erlauben sollten, also in etwa die der Faulschlammmenge, die auf einer KLA mit 50.000 EW anfällt. Wie im vorliegenden Projekt der KLA Linz-Unkel mit 775,5 t Trockenmasse pro Jahr (entspricht ca. 40.000 EW) unter Mitverwendung des Klärschlammes der benachbarten Kläranlagen Hallerbachtal (Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Asbach, ca. 10.000 EW) und Brochenbach (Verbandsgemeindewerke Linz, ca. 2.000 EW) wurde das geplante Verfahren als Möglichkeit zur dezentralen Klärschlamm Entsorgung und -verwertung betrachtet, d.h. als potentielle Alternative zur gemeinschaftlichen Entsorgung der Klärschlämme mehrerer Kläranlagen in einer Klärschlammverbrennungsanlage.

2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)

Aufgrund der geplanten Mitbehandlung der Klärschlämme der KLA Hallerbach und der KLA Brochenbach und der auf der KLA Linz-Unkel vorliegenden Schlammdaten wurden die nachfolgend aufgeführten Auslegungsdaten für die geplante neue Klärschlammbehandlungsanlage festgelegt:

Feststoff-Durchsatz-Menge:	ca. 563,4 t TM/a max. Durchsatz 700 t TM/a
Feststoffgehalt:	im Mittel 3,5 % TR Input in die Entwässerung: 2,5 bis 5 % TR
Feststoffgehalt nach Entwässerung:	im Mittel 26 % TR Input in die Trocknung: 25 bis 30 % TR
Feststoffgehalt nach Trocknung:	im Mittel 75 % TR zulässiger Bereich: 65 bis 85 % TR
Glühverlust:	ca. 55 % TR
Heizwert:	ca. 11.300 MJ/kg TM

Die neue Klärschlammbehandlungsanlage sollte einen periodischen Anlagenbetrieb über 4 Tage unter der Woche erlauben. Ein Anlagenbetrieb über das Wochenende sollte vermieden werden, da die KLA am Wochenende nicht dauerhaft besetzt war, sondern lediglich ein Bereitschaftsdienst bestand. Bis zur Außerbetriebnahme der Anlagenkombination aus Trockner und Karbonisierungsanlage 2022/23, konnte der geplante Anlagenbetrieb nicht erreicht werden. Der Anlagenbetrieb musste mit geringerem Durchsatz über eine längere Betriebszeit – auch am Wochenende - erfolgen. Gründe sind in Kap. 2.3 beschrieben.

Entsprechend der Planung sollte die Leistung der gesamten neuen Klärschlammbehandlungsanlage zum Projektstart ausreichen, um 563,4 t TM/a in 5.000 Betriebsstunden (Bh)/a zu karbonisieren. Die Anlage sollte bis zu maximal 7.500 Bh/a (ca. 6 Tage pro Woche) betrieben werden können, die restliche Zeit sollte vorwiegend für Wartungsarbeiten reserviert bleiben.

Daraus ergaben sich die folgenden Zielwerte für die neue Klärschlammbehandlungsanlage:

Betriebszeit:	5.000 Bh/a
	ca. 4,0 d/w im Zeitraum von Montag bis Freitag
Resultierender Durchsatz:	112,7 kg TM/Stunde (h)
Resultierender Eintrag in die Entwässerung:	3,22 Kubikmeter (m ³)/h mit 3,5 % TR
Resultierender Eintrag in die Trocknung:	433,3 kg/h mit 26 % TR
Resultierender Eintrag in die Karbonisierung:	132,5 kg/h mit 85 % TR

Der in der KLA Linz-Unkel anfallende Klärschlamm wird anaerob in zwei Faultürmen ausgefault. Anschließend wird er in zwei Nacheindickern zwischengelagert und von dort zum Entwässerungsaggregat gepumpt. Alternativ kann der ausgefaulte Schlamm direkt von den Faultürmen aus, dem Entwässerungsaggregat zugeführt werden.

Auch die Klärschlämme der KLA Hallerbach und der KLA Brochenbach sollten zunächst in den beiden Faultürmen der KLA Linz-Unkel ausgefault werden. Von der Annahme dieser Klärschlämme wurde aber letztlich abgesehen, da der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel ab ca. 2015/16 mit einem deutlichen Ansteigen der der KLA zulaufenden Fracht in den kommenden Jahren aufgrund eines örtlichen Industrieeinleiters rechnen musste. Die vorhandene Klärschlammbehandlungskapazität wurde folglich als Reserve für den Eigenbedarf der KLA Linz-Unkel vorgehalten und nicht für die beiden anderen Kläranlagen genutzt.

2.2.1 Klärschlammmentwässerung

Als Entwässerungsaggregat wurde bei der Ausarbeitung des Konzepts der künftigen Klärschlammbehandlung zunächst eine Siebbandpresse vorgesehen. Diese sollte den Klärschlamm mittels Druck und Schwerkraft entwässern. Bereits während der anschließenden Planungsphase hat es sich aber als sinnvoll herausgestellt, statt einer Siebbandpresse eine Schneckenpresse als neues kontinuierlich arbeitendes Schlammmentwässerungsaggregat zu installieren. Schneckenpressen zeichnen sich durch eine Entwässerungsleistung aus, die der einer Siebbandpresse mindestens vergleichbar ist, sie sind aber kompakter und kleiner gebaut und günstiger in den Investitions- und den Betriebskosten. Aufgrund dieser Eigenschaften hatten sie sich in der jüngeren Vergangenheit zunehmend mehr als Schlammmentwässerungsaggregate etabliert.

Entwässerungsversuche mit Schneckenpressen zweier Hersteller (Huber SE und IEA Derflinger GmbH) im Februar 2014 auf der KLA Linz-Unkel deuteten darauf hin, dass die für die KLA Linz-Unkel angestrebte Entwässerungsleistung (mind. 25 % TR) mit diesem Aggregat wirtschaftlich und betriebsicher erreicht werden könnte. Aufgrund dessen wurde eine Schneckenpresse der IEA Derflinger GmbH (Typ SP-HF 05 XL) auf der KLA Linz-Unkel eingeplant und installiert.

Die Abbildungen 2 und 3 zeigen das Prinzip der auf der KLA Linz-Unkel installierten Schlamm-entwässerung mit Schneckenpresse, sowie ein Bild der installierten Presse.

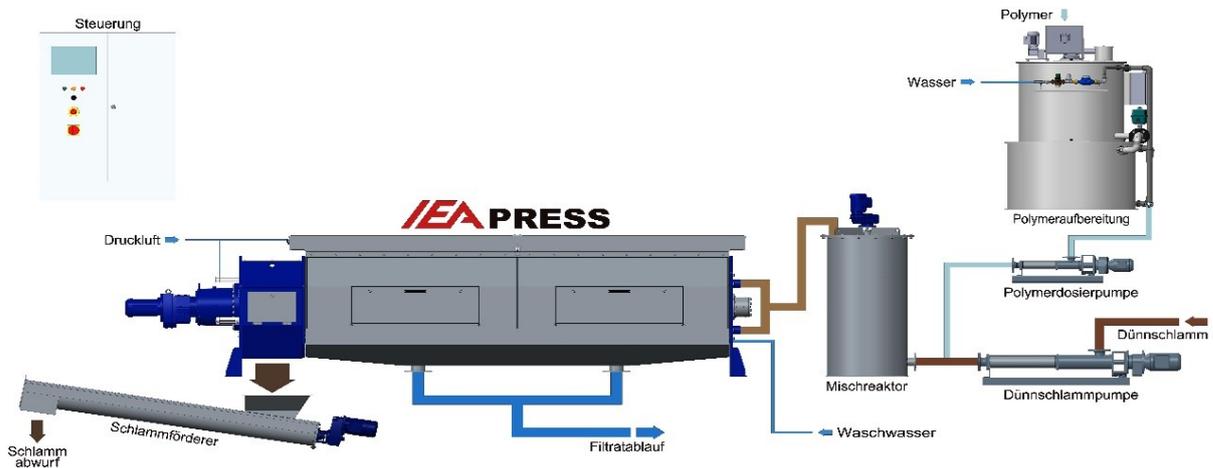


Abb. 2: Prinzipschema der installierten Schlamm-entwässerung mit Schneckenpresse
Quelle: ELIQUO STULZ



Abb. 3: Foto der installierten Schneckenpresse IEA Typ SP-HF 05 XL
Quelle: ELIQUO STULZ

Für die Entwässerung muss der ausgefaulte Schlamm konditioniert werden. Die Konditionierung erfolgt bei der Entwässerung mit Schneckenpressen durch die Zugabe und Untermischung einer Polymerlösung zum Schlamm.

Für die Herstellung der Polymerlösung kann sowohl Flüssig- als auch Pulver-Polymer eingesetzt werden. Pulver-Polymer war preisgünstiger als Flüssig-Polymer, weshalb auf der KLA Linz-Unkel Pulver-Polymer eingesetzt wurde. Seit Projektstart kam das Produkt 8160 der Firma ZETAG zum Einsatz.

Für die Herstellung der Polymerlösung wurde das Pulver-Polymer in einer Polymer-Aufbereitungsanlage mit Trinkwasser angesetzt, d.h. auf eine Konzentration von 0,1 bis max. 0,3 % verdünnt. Nach mindestens 30 min Reifezeit, in der der Ansatz permanent gerührt wurde, konnte die Lösung dem Schlamm zugemischt werden.

Ursprünglich war auf der KLA Linz-Unkel neben der Installation einer 2-Kammer Polymeraufbereitungsanlage auch ein FlocFormer® der Firma aqua-engineering GmbH zur optimalen Einmischung des Polymers in den ausgefaulten Schlamm vorgesehen. Die Schneckenpresse der IEA Derflinger war aber standardmäßig mit einem vorgeschalteten Mischbehälter ausgestattet, der für die Polymereinmischung ausreichte. Aus diesem Grunde wurde die KLA Linz-Unkel im Zuge der Ausrüstung der neuen Klärschlamm-Entwässerungsanlage lediglich mit einer 2-Kammer Polymeraufbereitungsanlage für Flüssig- oder Pulver-Polymer ausgerüstet; auf die Installation des FlocFormer® wurde verzichtet.

Sowohl Flüssig-, als auch Pulver-Polymer wirken sich bei korrekter und ökologischer Dosierung nicht nachteilig auf die folgende Klärschlamm-trocknung aus und sollten in der Karbonisierungsanlage thermisch zerstört werden.

2.2.2 Klärschlamm-trocknung

Für die Trocknung des entwässerten Klärschlamm auf der KLA Linz-Unkel wurde ein Niedertemperatur-Band-trockner vom Typ EloDry® der Firma ELIQUO STULZ mit einer Wasserverdampfungsleistung von max. ca. 350 kg/h ausgewählt und installiert. Dessen Funktionsweise ist in Abbildung 4 dargestellt.

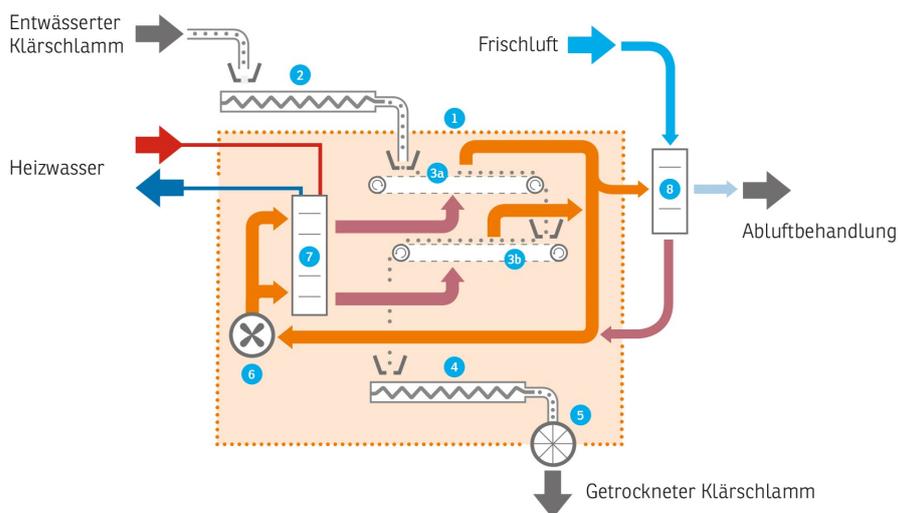


Abb. 4: Prinzip des Trockners EloDry®

Quelle: ELIQUO STULZ

Im Regelbetrieb (d.h., Trocknung und Karbonisierung sind in Betrieb) wird der frisch entwässerte Faulschlamm hinter der Schneckenpresse über eine Förderschnecke („Zufuhrschnecke“) direkt und ohne Zwischenspeicherung dem EloDry®-Trockner (1) zugeführt.

Über dem Trockner wirft die Zufuhrschnecke den entwässerten Schlamm in einen Zerkleinerer (2) ab, der oberhalb des Eintrags am Trockner angeordnet ist. Mit dem Zerkleinerer werden die unterschiedlich großen Partikel des entwässerten Schlammes in Partikel ähnlicher Größe (2 - 5 mm) überführt. Diese weisen eine große Oberfläche auf, was für die Niedertemperatur-trocknung ideal ist.

Im Aufgabebereich des Trockners wird der Schlamm von der Verteilschnecke aufgenommen und gleichmäßig auf dem Trockner-Oberband (3a) aufgebracht. Das Trockner-Oberband trägt die Schlammpartikel durch den Trockner hindurch zum Trockner-Ende und wirft sie dort auf das Unterband (3b) ab. Das Trockner-Unterband trägt die Partikel anschließend durch den Trockner zurück bis zum Trockner-Kopf.

Während die Trockenbänder die Klärschlammartikel durch den Trockner tragen, werden sie mit Hilfe von warmer Luft getrocknet. Die von Ventilatoren (6) umgewälzte Trocknerluft wird durch im Trockner installierte Wärmetauscher (7) auf ca. 75 - 85 °C erwärmt.

Im Trockner-Kopf werden die getrockneten Partikel von der Austragsschnecke (4) über eine Zellenradschleuse (5) aus dem Trockner ausgetragen und einer Schrägförderschnecke zugeleitet, die sie in den Vorlagebehälter für den nächsten Prozessschritt, der Karbonisierung, überführt. Alternativ kann der getrocknete Klärschlamm direkt über die Schrägförderschnecke in einen Container gefördert werden.

Das für die KLA Linz-Unkel ausgearbeitete Anlagenkonzept sah vor, dass die Zufuhrschnecke, die den frisch entwässerten Klärschlamm im Regelbetrieb dem Trockner zuführt, neben dem Abwurf über dem Trockner noch über einen zweiten Abwurf verfügt. Über diesen zweiten Abwurf könnte der Trockner umfahren werden: Der entwässerte Schlamm würde bei Umfahrung der Trocknungsstufe über den zweiten Abwurf der Zufuhrschnecke unmittelbar der Schrägförderschnecke zugeführt, die das getrocknete Material vom Trockner zum Vorlagebehälter der Karbonisierungsanlage fördert oder alternativ an der Karbonisierungsanlage vorbei in einen Container weiterleitet. Falls die beiden Prozessschritte Trocknung und Karbonisierung umfahren würden (z.B. bei Wartungsarbeiten), könnte so der entwässerte Schlamm direkt in einen Container ausgetragen werden.

Dieses Konzept zur Umfahrung wurde wie vorgesehen umgesetzt. Auf der KLA Linz-Unkel standen dauerhaft mindestens 2 Container zur Verfügung. Falls anstatt Karbonisat entwässerter oder getrockneter Klärschlamm ausgetragen werden sollte, musste hierfür der Container manuell gewechselt werden um ein Vermischen der verschiedenen Endprodukte zu vermeiden.

Als Wärmeträger für die Beheizung der Trocknerluft sollte Warmwasser von 85 - 95 °C genutzt werden, welches die Abwärme der Mikrogasturbine, der Karbonisierungsanlage und eines bereits auf der Anlage vorhandenen erdgasbetriebenen Notheizkessels zum Trockner

transportiert. Die geplante und umgesetzte Einbindung von Schlamm-trocknung und Schlamm-karbonisierung in das Wärmenetz der KLA ist in Abbildung 5, sowie im Gesamtkonzept in Anhang 1 dargestellt.

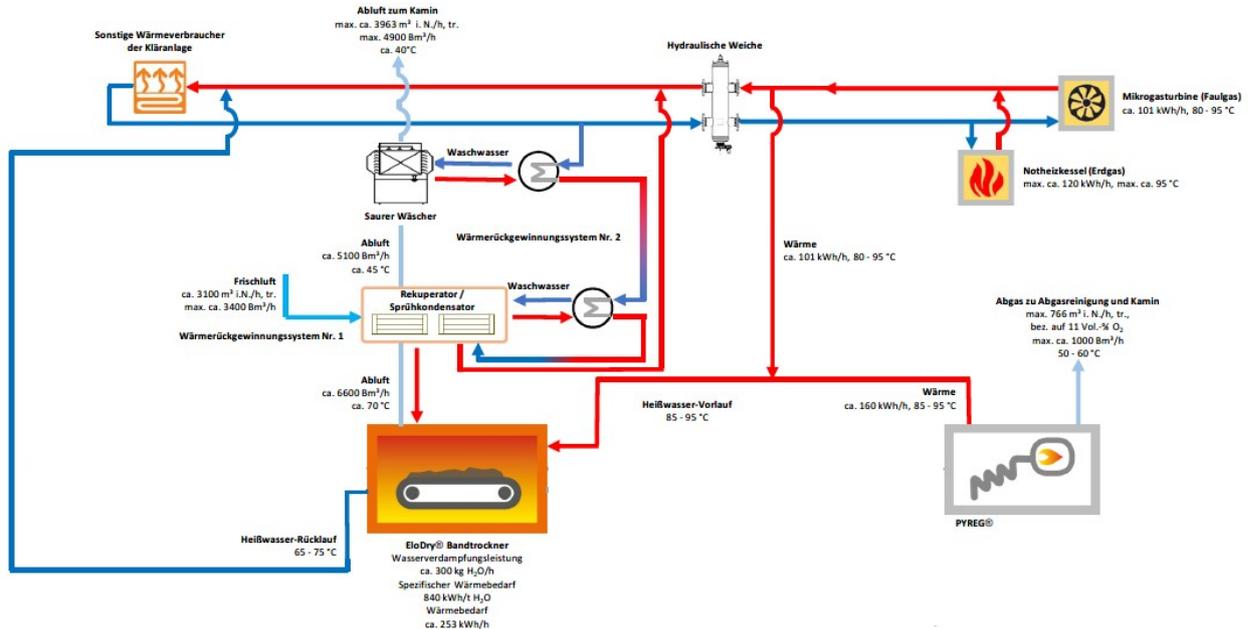


Abb. 5: Schema der geplanten Einbindung der Anlagenkomponenten ins Wärmenetz der KLA

Der Notheizkessel sollte nur im Ausnahmefall zum Einsatz kommen, z.B. bei Wartungsarbeiten an der Mikrogasturbine.

In Abbildung 5 sind auch die Wärmerückgewinnungssysteme Nr. 1 und Nr. 2 dargestellt, die geplant und installiert wurden, um Wärme aus der Trocknerabluft zurückzugewinnen:

Die feuchte Trockner-Abluft wird zunächst einem Rekuperator/Sprühkondensator und danach einem sauren Wäscher zugeführt. Der Rekuperator/Sprühkondensator dient zur internen Wärmerückgewinnung. Das Kernstück ist ein Luft-/Luft-Wärmetauscher, der der Abluft Wärme entzieht und die zurückgewonnene Wärme an die zugeführte Frischluft übergibt (Wärmerückgewinnungssystem Nr. 1 aus der Trocknerabluft). Dem Luft-/Luft-Wärmetauscher ist ein Luft-/Wasser-Wärmetauscher nachgeschaltet. Dieser ist Teil eines weiteren Wärmerückgewinnungssystems (Wärmerückgewinnungssystem Nr. 2 aus der Trocknerabluft). Ziel von Wärmerückgewinnungssystem Nr. 2 aus der Trocknerabluft ist, der im Wärmerückgewinnungssystem Nr. 1 bereits abgekühlten Trocknerabluft weitere Abwärme auf niedrigem Temperaturniveau von bis zu ca. 65 °C zu entziehen. Hierfür wurden neben dem bereits erwähnten Luft-/Wasser-Wärmetauscher im Rekuperator/Sprühkondensator noch zwei Wasser-/Wasser-Wärmetauscher installiert - Einer um Wärme aus dem im Rekuperator anfallenden Kondensat und dem Abwasser des Sprühkondensators zurückzugewinnen, der Andere um die im Abwasser des sauren Wäschers enthaltene Restwärme zu nutzen.

Die Abwärme sollte für die Nutzung durch die anderen wesentlichen Wärmeverbraucher der Kläranlage - die Faultürmen und die Gebäudeheizung - zur Verfügung gestellt werden.

Die Trocknerabluft aus kommunalem Klärschlamm enthält insbesondere große Mengen an

Ammoniak. Sie muss, bevor Sie in die Umgebung abgegeben werden darf, die genehmigungsrechtlichen Anforderungen erfüllen. Die genehmigungsrechtlichen Anforderungen an die Trocknerabluft der KLA Linz-Unkel sind in Tabelle 1 wiedergegeben.

Die im Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014 (Anhang 2) geforderten Emissionswerte für die Abluft der Klärschlamm-trocknung der KLA Linz-Unkel liegen dabei deutlich unter den Anforderungen der TA-Luft. Messergebnisse sind in Kap. 2.3.3 dargestellt.

Tab. 1: Genehmigungsrechtliche Anforderungen an die Trocknerabluft der KLA Linz-Unkel und Grenzwerte nach der TA-Luft

Messkomponente	Einheit	Grenzwerte für die Klärschlamm-trocknungsanlage der KLA Linz-Unkel gemäß Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014	Grenzwert gemäß TA-Luft*
Ges-C	mg/m ³	15	20
HCl	mg/m ³	1	20
NH ₃	mg/m ³	1	20
Gesamtstaub	mg/m ³	2	10
Geruch	GE _E /m ³	400	500

* Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft, Fassung vom 24. Juli 2002

Um die genehmigungsrechtlichen Anforderungen an die Trocknerabluft gem. TA-Luft bzw. entsprechend dem Genehmigungsbescheid, v.a. in Bezug auf Ammoniak, zu erfüllen, wurde ein saurer Wäscher installiert, der als Kreuzstromwäscher arbeitet. Darin wird die Abluft vor dem Austritt in die Atmosphäre mit schwefelsäurehaltigem Waschwasser behandelt. Ein Teil des Waschwassers wird in regelmäßigen Intervallen abgeschlämmt und dem Kläranlagen-Zulauf zugeführt.

Im sauren Wäscher wird Ammoniak (Messkomponente NH₃) absorbiert und als Ammoniumsulfat mit dem Waschwasser ausgetragen. Das saure Waschwasser reduziert darüber hinaus den Staubgehalt (Messkomponente Gesamtstaub), gasförmige anorganische Chlorverbindungen (Messkomponente HCl) und wasserlösliche, Geruch verursachende Komponenten (Messkomponente Geruch). Wasserunlösliche, Geruch verursachende Komponenten und organische Stoffe (Messkomponente Ges-C = "Gesamt-Kohlenstoff") werden dagegen üblicherweise nicht beeinflusst. Insbesondere werden Methanreste, welche sich im Faulschlamm befinden und während der Trocknung aus dem Schlamm ausgetrieben werden, im sauren Wäscher nicht reduziert. Aufgrund von Erfahrungen der Projektbeteiligten aus anderen Klärschlamm-trocknungsprojekten erschienen über die Installation eines sauren Wäschers hinausgehende Maßnahmen zur Behandlung der Trocknerabluft auf der KLA Linz-Unkel zunächst nicht erforderlich.

Die Klärschlamm-Trocknungsanlage auf der KLA Linz-Unkel wurde für die folgenden Luftmengen ausgelegt:

- ca. 3.100 m³ i. N./h, tr., Frischluft
- max. 3.963 m³ i. N./h, tr.,- Abluft (Summe aus Frischluft und Falschlufft)

Hinter dem sauren Wäscher wurde ein Abluftventilator vorgesehen und installiert. Er sorgte für die Absaugung der feuchten Abluft aus dem Trockner, durch den Rekuperator/Sprühkondensator, den sauren Wäscher und den Abluftschornstein. Die Regelung des Abluftventilators erfolgte derart, dass der Trockner permanent im leichten Unterdruck (ca. 5 bis 15 mbar) betrieben wurde, um unkontrollierte (diffuse) Emissionen in die Umgebung zu vermeiden. Im Betrieb musste hinter dem sauren Wäscher eine UV-Oxidationsanlage nachgerüstet werden (vgl. Kap. 2.3).

Der Bandtrockner selbst ist mit diversen Temperaturmessungen ausgestattet. Diese dienen, neben der kontinuierlichen Schlammfeuchtemessung im Trockneraustrag, zur Steuerung der Trocknung und zur Sicherstellung des angestrebten Trocknungsergebnisses. Des Weiteren sind die Temperaturmessungen in der Nähe des Trockengutaustrags zusammen mit einer Streulichtmessung, die in der Abluftleitung zum Rekuperator installiert ist, Teil der Sicherheitsmaßnahmen zum Brand- und Explosionsschutz. Im Alarmfall - bei Übertemperatur im getrockneten Material oder bei erhöhten Rauch-/Staub-Konzentrationen in der Abluftleitung - löst eine im Trockner installierte Sprühflutanlage aus, die mit Wasser aus dem öffentlichen Trinkwassernetz gespeist wird. Ein Foto des auf der KLA Linz-Unkel installierten Bandtrockners EloDry® ist in Abbildung 6 dargestellt.



Abb. 6: Foto des installierten Bandtrockners EloDry®
Quelle: ELIQUO STULZ

2.2.3 Klärschlammkarbonisierung

Für die Klärschlammkarbonisierung wurde eine PYREG®-Anlage eingeplant und installiert. Deren Herzstück sind zwei parallel angeordnete und parallel betriebene Karbonisierungsreaktoren, die PYREG®-Reaktoren.

Die zum damaligen Zeitpunkt verfügbare PYREG®-Anlagengröße war für die Zufuhr von organischem Material mit einer Leistung von max. 500 Kilowatt (kW) ausgelegt. Hiermit konnte Klärschlamm karbonisiert werden, der einen Heizwert von mind. ca. 10.000 Kilojoule/Kilogramm (kJ/kg) aufwies.

Das PYREG®-Verfahren beruht darauf, dass die organischen Inhaltsstoffe des getrockneten Klärschlammes durch Erwärmen in den PYREG®-Reaktoren auf Temperaturen von 550 - 650 °C bei geringer Luftzufuhr zu elementarem Kohlenstoff umgewandelt werden. Durch die geringe Luftzufuhr in die Reaktoren wird das Trockengut verschwelt, wodurch sich das PYREG®-Verfahren von einer Pyrolyse, die sauerstofffrei arbeitet, unterscheidet. In den Reaktoren entsteht bei der Verschwelung des Klärschlammes neben dem Karbonisat ein brennbares Gas („Prozessgas“). Das Prozessgas wird in einer, den Reaktoren nachgeschalteten Brennkammer, die Teil der PYREG®-Anlage ist, verbrannt. Die dabei entstehende Verbrennungswärme dient wiederum zur Beheizung der Reaktoren.

Die auf der KLA Linz-Unkel installierte PYREG®-Anlage bestand aus folgenden Komponenten:

- einem Vorlagebehälter für den getrockneten Klärschlamm,
- zwei nebeneinander angeordneten, parallel arbeitenden Karbonisierungseinheiten, jede bestehend aus einer Dosierschnecke, einer Zellenradschleuse und einem Doppelschnecken-Karbonisierungsreaktor mit Doppelmantel („PYREG®-Reaktor“),
- einem, für beide Karbonisierungseinheiten gemeinsamen, Prozessgas-Zyklon (Staubabscheider),
- einer Brennkammer für das Prozessgas,
- der Abgaskühlung über zwei Wärmetauscher,
- der Abgasreinigung über einen Nasswäscher und einen Festbettaktivkohlefilter,
- den beiden Abgasgebläsen und dem Abgaskamin, sowie
- dem Karbonisatustragssystem.

Auf der KLA Linz Unkel wurde der aus dem Trockner ausgetragene getrocknete Klärschlamm über eine Schrägförderschnecke dem Vorlagebehälter der PYREG®-Anlage zugeführt.

Beim Betrieb der PYREG®-Anlage werden die beiden Karbonisierungseinheiten aus dem Vorlagebehälter gleichzeitig parallel mit dem getrocknetem Klärschlamm beschickt. Die Dosierschnecken führen das Trockengut gleichmäßig und kontrolliert den Karbonisierungsreaktoren (PYREG®-Reaktoren) zu. Die Zellenradschleusen sichern die Reaktoren gegen unkontrollierten Lufteintritt. Zur Überwachung von Rückbränden ist unterhalb der Zellenrad-

schleuse eine Temperaturüberwachung installiert. In den beiden PYREG®-Reaktoren findet die Karbonisierung statt. Jeder Reaktor besteht aus zwei ineinander kämmenden Förderschnecken, die das zu karbonisierende Material kontinuierlich bei 550 - 650 °C durch den Reaktor fördern und dabei umschichten. Am Eintritt in jeden Reaktor erfolgt die kontrollierbare Luftzufuhr, die Luft in einem unterstöchiometrischen Verhältnis von λ 0,3 zuströmen lässt.

Das in den beiden Reaktoren erzeugte Gas („Prozessgas“) wird nach der Entstaubung über einen gemeinsamen Prozessgas-Zyklon einer gemeinsamen Brennkammer zugeführt. Hier wird das Gas kontrolliert mit Hilfe eines flammlosen Brenners nach dem FLOX®-Verfahren verbrannt. FLOX steht für flammenlose Oxidation und bezeichnet ein technisches Brennverfahren ohne Flammenbildung mit geringer Stickoxid (NO_x)-Bildung (Bau des Brenners durch die Firma PYREG GmbH in Lizenz der Firma WS-Wärmeprozessstechnik GmbH, Renningen). Durch die intensive Mischung des Prozessgases im FLOX®-Brenner mit weiterer Frischluft (Verbrennungsluft) erfolgt eine gleichmäßige Verbrennung mit geringem Kohlenmonoxid (CO)-Gehalt. Die zur Verbrennung nötige Frischluft wird durch einen Verbrennungsluftventilator angesaugt; dieser sorgt für einen kontrollierbaren Frischluftvolumenstrom. Bei einer Verbrennungstemperatur von ca. 1.000 °C entsteht im FLOX®-Brenner unter, für dessen Betrieb, optimalen Bedingungen (u.a. Staubfreiheit) trotz des relativ hohen Stickstoffgehalts im Klärschlamm nur wenig Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO_2) und Distickstoffmonoxid (N_2O), so dass auf Sekundärmaßnahmen zur Entstickung verzichtet werden kann. Eine optional einsetzbare Abgasrückführung sorgt für die weitere Reduktion der Stickoxidwerte und eine Optimierung des Wärmehaushaltes. Flammenwächter, Druckaufnehmer und Temperatursonden stehen zur Überwachung des Verbrennungsvorgangs zur Verfügung.

Das heiße Abgas verlässt die Brennkammer und wird ebenfalls mit Luft vermischt, bevor es zur Beheizung der PYREG®-Reaktoren in den isolierten Doppelmantel der beiden Reaktoren geführt wird und diesen anschließend mit einer Temperatur von ca. 600 °C wieder verlässt. Die beiden Abgasströme der Karbonisierungsreaktoren werden hinter diesen wieder vereint und dem ersten Abgaswärmetauscher zugeführt. Dieser kühlt das Abgas, indem er die Wärme an einen Wasserkreislauf abgibt, der den Klärschlammrockner versorgt (siehe hierzu Kap. 2.2, Technische Lösung / Klärschlammrocknung, und die Abbildung im Anhang 1). Das abgekühlte Abgas wird anschließend über einen zweiten Wärmetauscher gesaugt. Im zweiten Wärmetauscher wird der Rücklauf des Heizwassers vom Klärschlammrockner vorgewärmt, bevor es im ersten Wärmetauscher auf die zur Beheizung gewünschte Vorlauftemperatur von 85 - 95 °C erwärmt wird. Hinter dem 2. Wärmetauscher wird das Abgas, das noch ca. 95 - 100 °C aufweist, dem Abgaswäscher, einem Nasswäscher, zugeführt. Im Wäscher wird das Abgas durch, mit Natronlauge, alkalisch eingestelltes Waschwasser von sauren Abgasbestandteilen befreit. Anschließend strömt es durch einen Aktivkohlefilter, in dem Quecksilber und Schwermetalle abgeschieden werden. Die Aktivkohle muss regelmäßig gewechselt und als Abfall entsorgt werden. Hinter dem Aktivkohlefilter wird das Abgas durch zwei hintereinander geschaltete Abgasventilatoren in den Schornstein gefördert und mit etwa 50 - 60 °C in die

Umgebung abgeleitet. Im Schornstein befindet sich die Emissionsmessenstrecke zur Überwachung der von der Genehmigungsbehörde festgelegten Emissionsgrenzwerte (siehe Genehmigungsbescheid, Anhang 2). Abbildung 7 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage.

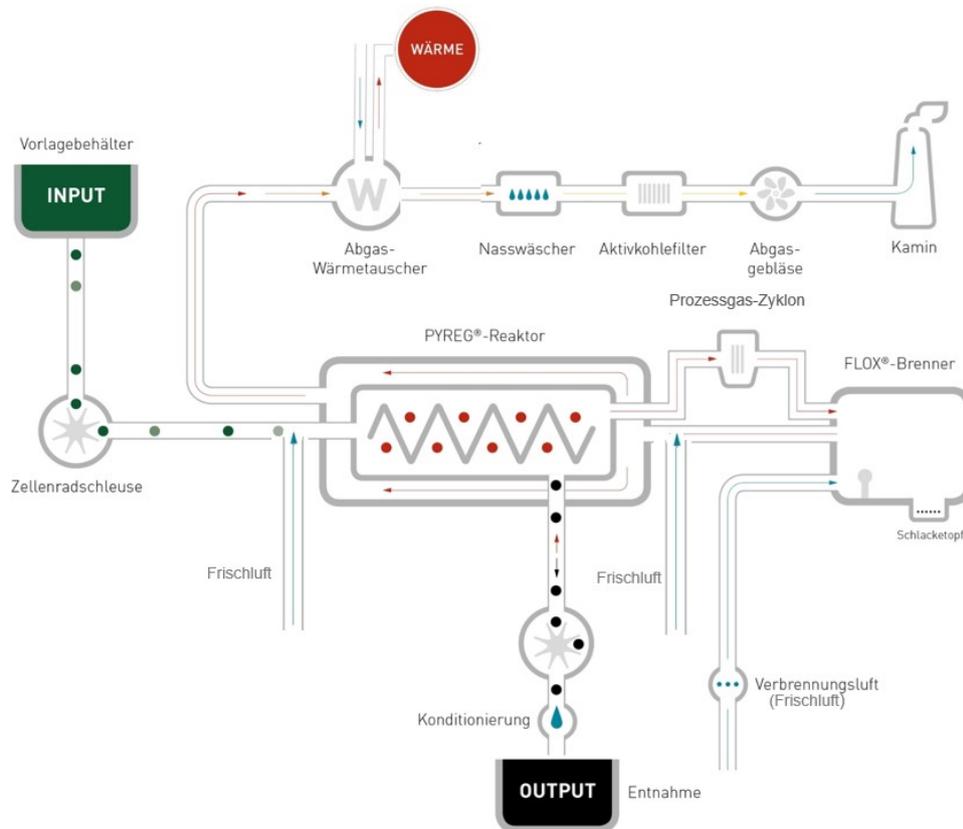


Abb. 7: Vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage

Quelle: PYREG GmbH

Der karbonisierte Klärschlamm aus den beiden Karbonisierungsreaktoren wird in einer Sammelschnecke zusammengetragen. Die Sammelschnecke übergibt das Karbonisat an eine Zellenradschleuse, die als Luftschleuse dient. Die Zellenradschleuse wirft das Gut in eine ansteigende Förderschnecke ab. Mit Hilfe dieser Förderschnecke wird das Karbonisat zur Verladeschnecke transportiert. Zur Agglomeration von Staubpartikeln im Karbonisat befindet sich im Eintritt der Förderschnecke eine Wassereindüsung, welche das Karbonisat auf ca. 20 % Wassergehalt anfeuchtet.

Die Karbonisierungsreaktoren, die Prozessgasleitung und die gesamte Abgasführung bis hinter der Abgaswäsche werden im Unterdruck betrieben, um den unkontrollierten Austritt heißer Gase und Schadstoffe zu verhindern. Für den Unterdruck sorgen zwei redundant arbeitende Abgasgebläse (Saugzug-Ventilatoren). Diese ziehen das Prozessgas aus den Reaktoren in die Brennkammer und das Abgas aus der Brennkammer über die Reaktoren, durch die Abgaswärmetauscher und die Abgasreinigungsanlage und drücken es durch den Schornstein mit der Emissionsmessenstrecke. Einer der beiden Abgasventilatoren ist an einer unterbrechungsfreien Stromversorgung angeschlossen, die bei totalem Stromausfall dafür sorgt, dass der

Unterdruck in den Karbonisierungsreaktoren und der Gasstrecke aufrecht erhalten bleibt und ein kontrolliertes und gefahrenloses Abfahren der Karbonisierungsanlage erfolgen kann.

2.2.4 Anlagensteuerung

Die PYREG®-Anlage verfügt über eine eigene Anlagensteuerung auf Basis einer speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) vom Typ SIEMENS S7. Zentraler Baustein dieser Anlagensteuerung ist die sicherheitsgerichtete Schaltung (Sicherheitsgerichtete Schaltung entsprechend DIN EN ISO 13 849-1, Sicherheitsanforderungsstufe/Safety Integrity Level (SIL) 2).

Die PYREG®-Anlage verfügt über eine Notabschaltung und über eine Sicherheitsabschaltung:

Die Notabschaltungsverfahren ermöglicht es, die Anlage aus jeder Betriebssituation schnellstmöglich in einen sicheren Zustand zu versetzen. Bei der Notabschaltung werden alle Antriebe der Anlage bis auf das Notfallgebläse zur Aufrechterhaltung des Unterdruckes stromlos geschaltet. Die SPS-Steuerung, ein Abgasgebläse und die Sicherheitskette der Anlage werden über eine unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) auch bei Netzausfall weiter mit Spannung versorgt. Die Brenngasproduktion kann so innerhalb von wenigen Minuten unterbrochen werden, während gleichzeitig die gerichtete Gasströmung in der Anlage bis zum Erkalten der Anlage aufrechterhalten wird.

Die Sicherheitsabschaltung dient zum sicheren planmäßigen Herunterfahren der Anlage. Hierbei wird die Brennstoffzufuhr gestoppt und die Fördergeschwindigkeit der Reaktoren reduziert. Durch die fortschreitende Reduktion der Brenngasproduktion kühlt die Anlage aus. Die Qualität der Karbonisierung der Restbiomasse in den beiden Reaktoren und der Verbrennung des Prozessgases im FLOX®-Brenner wird durch die Anlagensteuerung weiterhin überwacht und gewährleistet.

In der SPS der PYREG®-Anlage werden auch die für die Anlage hinterlegten Messwerte erfasst und ausgewertet. Falls es zur Über- oder Unterschreitung von sicherheitsrelevanten Grenzwerten kommt, erfolgt eine Alarmierung bzw. das System reagiert so, wie es für den jeweiligen (Not-)Fall in der Steuerung hinterlegt ist, d.h. ggf. mit der Abschaltung.

Zur automatischen Steuerung und Regelung der restlichen Komponenten der neuen Klärschlammbehandlungsanlage wurde eine SPS des Typs Siemens S7-315-2-PN/DP mit integrierter DisplayPort (DP)-Schnittstelle zur Anbindung der externen Baugruppen eingesetzt. Sie ist im Hauptschaltschrank im Schlammbehandlungsgebäude untergebracht. Hier werden auch die Messwerte der restlichen Anlagenkomponenten erfasst und ausgewertet, mit entsprechender Reaktion bei Über- bzw. Unterschreitung.

Im Hauptschaltschrank der Schlammbehandlungsanlage untergebracht ist neben der SPS für alle Anlagenkomponenten, die nicht zur PYREG®-Anlage gehören - d.h. im Wesentlichen die SPSen für die Klärschlammwässerung und -trocknung - das übergeordnete Prozessleitsystem (PLS) der gesamten neuen Schlammbehandlungsanlage. Es basiert auf dem WinCC® System der Siemens AG und ist als Einzelplatzsystem realisiert. Das Bedienelement des WinCC®-Einzelplatzsystems ist als Touch-Panel in der Schaltschrankfront der Anlage eingebaut. Hier werden auch die Meldungen und Informationen der PYREG®-Anlage erfasst und weiterverarbeitet.

Die Daten des Prozessleitsystems der neuen Klärschlamm-Entwässerungs-, Trocknungs- und Karbonisierungsanlage werden über eine Lichtwellenleiter(LWL)-Ringleitung (Industrial Ethernet) an das zentrale Prozessleitsystem der Kläranlage, Typ ProWin® der OHP Automation Systems GmbH, Rodgau, übermittelt und kommunizieren auf diesem Weg mit diversen externen Steuerungen der Kläranlage. Auch sämtliche Kommunikationsdaten von und zu der separaten Steuerung der PYREG®-Anlage werden in speziellen Schnittstellenbildern am zentralen Prozessleitsystem der Kläranlage angezeigt. Alle Kommunikationsverbindungen werden fortlaufend überwacht und bei einem Kommunikationsausfall sofort am PLS gemeldet.

2.2.5 Anlagenaufstellung

Für die zuvor beschriebene Anlagentechnik wurde neben der bestehenden Kompaktfaulungsanlage ein neues Schlammbehandlungsgebäude geplant und errichtet. Schlamm-entwässerung und Schlamm-trocknung mit Abluftbehandlung wurden in diesem Gebäude untergebracht. Die Karbonisierungsanlage wurde, ebenso wie die beiden Container für das Karbonisat bzw. entwässerten oder getrockneten Klärschlamm, neben dem neuen Schlamm-behandlungsgebäude installiert. Für den Container, der gerade befüllt wird, wurde eine Überdachung errichtet.

Ein Foto der Anlagenaufstellung auf der Kläranlage ist in Abbildung 8 dargestellt.



Abb. 8: Foto der PYREG®-Anlage mit dahinter eingebaute Entwässerungs- und Trocknungsanlage

2.3. Umsetzung des Vorhabens

Dem vom Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel eingereichten Antrag vom 29.10.2013 mit Ergänzung vom 14.01.2014 auf Neugenehmigung gemäß §§ 4, 19 Bundesimmissionschutzgesetz (BImSchG) zur Errichtung und zum Betrieb einer thermischen Klärschlamm-behandlungsanlage auf der Kläranlage Linz-Unkel wurde am 14.02.2014 stattgegeben (Genehmigungsbescheid, Anhang 2).

Die neue Klärschlammbehandlungsanlage wurde daraufhin ausgeschrieben; im August 2014 wurde die ARGE PYREG/ELIQUO STULZ mit der Realisierung der geplanten neuen Anlage beauftragt. Zu diesem Zeitpunkt war aufgrund der in Kap. 2.2., im Kapitel Klärschlamm-entwässerung, beschriebenen Ergebnisse der vorangegangenen Schlammmentwässerungsversuche in der Ausschreibung bereits eine Schneckenpresse statt der ursprünglich vorgesehenen und mit Datum vom 14.02.2014 genehmigten Siebbandpresse eingeplant.

Die Implementierung und Inbetriebnahme der neuen Schlammbehandlungsanlage erfolgte ab Auftragserteilung am 08.08.2014 bis Anfang September 2015 wie in Kap. 2.2. dieses Berichts beschrieben.

Dabei zeigten sich die in den Kap 2.3.1 bis 2.3.3 beschriebenen Schwierigkeiten.

2.3.1. Anlagendurchsatz

Geplant war 112,7 kg TM/h über einen Zeitraum von 4 d/w in der neuen Schlammbehandlungsanlage zu karbonisieren (siehe Abbildung in Anhang 1). Dieser Anlagendurchsatz konnte nicht erreicht werden. Die Gründe hierfür, die getroffenen Optimierungsmaßnahmen und die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben:

- **Klärschlammmentwässerung**

Bei den im Februar 2014 durchgeführten Schlammmentwässerungsversuchen mit Schneckenpressen zweier Hersteller wurde mit dem Aggregat der IEA Derflinger GmbH, das schließlich auf der KLA Linz-Unkel installiert wurde, der gewünschte Entwässerungsgrad von im Mittel 26 % TR (mind. aber 25 % TR) mühelos erreicht.

Im späteren Anlagenbetrieb zeigte sich, dass dieser Trockenrückstand im entwässerten Schlamm dauerhaft, unabhängig von der Jahreszeit, nur bei reduziertem Durchsatz erzielt werden kann (max. ca. 90 kg TM/h, meist ca. 60 - 70 kg TM/h, statt der geplanten 112,7 kg TM/h).

Als wesentlicher Grund für die gegenüber 2014, vor dem Umbau, schlechtere Schlammmentwässerbarkeit wurde die veränderte Schlammqualität ermittelt:

Bei den Entwässerungsversuchen 2014 enthielt der Schlamm aufgrund der damaligen Kalk-/Eisenkonditionierung für die Entwässerung mit der Kammerfilterpresse signifikante Kalk-/Eisen-Mengen. Diese verschwanden nach dem Ersatz der Kammerfilterpresse durch die neue Schneckenpresse aus dem System, da nicht mehr mit Kalk, sondern mit Polymer konditioniert wurde.

Zusätzlich wurde festgestellt, dass der Glühverlust, d.h. der organische Trockenrückstand (oTR) im Schlamm, der gemäß Auslegung ca. 55 % betragen sollte (siehe Kap. 2.2.), in der Regel höher war. Ab 2019 bis heute betrug er in den warmen Monaten meist 57 - 58 %, in der kalten Jahreszeit bis zu 62 - 63 %. Anfang 2021 wurden sogar Werte von bis zu ca. 66 % oTR ermittelt, was problematisch war, da sich die Entwässerbarkeit von kommunalem Klärschlamm mit steigendem oTR verschlechtert.

Darüber hinaus wurde ab ca. 4. Quartal 2018 beobachtet, dass die Öffnungen der Siebkörbe der Schneckenpresse nach einiger Zeit mit einem pelzigen Belag zuwuchsen. Die regelmäßigen Kontrollen des Trockenstoffgehalts im entwässerten Schlamm durch das Personal der Kläranlage zeigten, dass dieser Belag die Entwässerungsleistung der Presse ebenfalls negativ beeinflusste. Er wurde deswegen regelmäßig, alle 2 bis 4 Wochen, mit dem Hochdruckreiniger vom Siebkorb entfernt.

Diese Pressenreinigung war mit erheblichem Arbeitsaufwand verbunden (pro Reinigung: ca. 4 Personalstunden).

Ab Mitte 2019 wurden zusammen mit dem Projektpartner ELIQUO STULZ und dem Lieferanten der installierten Schneckenpresse, IEA Derflinger GmbH, Versuche zur Optimierung und Stabilisierung der Schneckenpressenleistung durchgeführt:

1. Die Einstellungen der Schneckenpresse wurden überprüft.

Ergebnis: Die Presse war bereits sehr gut eingestellt, es waren keine nennenswerten Anpassungen erforderlich.

2. Es wurden Schlammflockungsversuche mit alternativen Polymeren und verschiedenen Polymerkonzentrationen und -mengen durchgeführt.

Ergebnis: Das bereits vorher eingesetzte Pulverpolymer ZETAG 8160 erwies sich als optimal geeignet.

3. Es wurde versucht, die Siebkorbreinigung durch den Einsatz von Essigsäure zu vereinfachen.

Ergebnis: Säure hatte keine Auswirkungen auf den Belag des Siebkorbs, dieser ließ sich dadurch weder leichter noch schneller reinigen.

Die ursprüngliche Planung sah vor, dass auf der KLA Linz-Unkel künftig nicht nur der eigene Schlamm, sondern auch der Nassschlamm der KLA Hallerbach und der KLA Brochenbach entwässert, getrocknet und karbonisiert werden sollte (siehe Kap. 2.1.). Dieses Ziel wurde aufgegeben, da der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel, insbesondere aufgrund eines Einleiters aus der Lebensmittelindustrie, zwischenzeitlich mit einem deutlichen Anstieg des Abwasseranfalls und der Klärschlammmenge auf der KLA Linz-Unkel in den Folgejahren rechnen musste.

Der Klärschlamm der KLA Hallerbach sollte folglich künftig vor Ort entwässert werden. Für die dort anfallende Menge ist die ursprünglich auf der KLA Linz-Unkel installierte Presse ausreichend.

Aus diesen Gründen wurde Anfang 2020 entschieden, die auf der KLA Linz-Unkel installierte Schneckenpresse (IEA, Typ SP-HF 05 XL) gegen ein größeres Aggregat (IEA, Typ SP-HF 065 XLG) zu tauschen und die bisher auf der KLA Linz-Unkel eingesetzte Presse für die Entwässerung des Klärschlammes der KLA Hallerbach zu nutzen.

Der Austausch der auf der KLA Linz-Unkel installierten Schneckenpresse gegen das größere Aggregat erfolgte Ende 2020, seit Anfang 2021 wurde damit entwässert. Diese

Schneckenpresse erreichte den geplanten Durchsatz von 112,7 kg TM/h über den Zeitraum von 4 d/w und den angestrebten Trockenstoffgehalt von 26 % TR im entwässerten Schlamm unabhängig von der Jahreszeit.

- **Klärschlamm-trocknung**

Im Anlagenbetrieb wurde festgestellt, dass sich die im EloDry® installierten Lamellen-Wärmetauscher mit Staub belegten, was die Wärmeübertragung und damit den Durchsatz reduzierte. Als Optimierungsmaßnahme wurden auf Wechselrahmen aufgezogene Staubfilter installiert, die das Problem lösten, sofern die Filter regelmäßig gewechselt wurden. Der Wartungsaufwand für den Trockner stieg dadurch (je Filterwechsel ca. 4 Personalstunden).

- **Klärschlammkarbonisierung**

Die auf der KLA Linz-Unkel installierte PYREG®-Anlage war die erste, die auf einer Kläranlage in Deutschland in die Schlammbehandlung integriert wurde und zur thermischen Behandlung von Klärschlamm im Dauerbetrieb eingesetzt werden sollte. Profunde Erfahrungen insbesondere zum stabilen Dauerbetrieb der Anlage fehlten folglich beim Projektstart auf der KLA Linz-Unkel.

Es zeigte sich folgendes:

1. Der Schlamm, der der Klärschlammkarbonisierungsanlage zugeführt wurde, musste im Gegensatz zur ursprünglichen Annahme statt auf 85 % auf mind. 90 % TR getrocknet werden um den stabilen Betrieb der Anlage sicherzustellen.
Der auf der KLA Linz-Unkel installierte Niedertemperatur-Bandrockner konnte zwar die hierfür erforderliche höhere Wasserverdampfungsleistung sicher gewährleisten (Mehrbedarf gegenüber der Planung gemäß Abbildung in Anhang 1: Statt ca. 300 kg H₂O/h müssen mind. ca. 307,3 kg H₂O/h verdampft werden, d.h. Mehrbedarf ca. 2,5 %), Voraussetzung war aber, dass die zusätzlich benötigte Trocknungswärme zur Verfügung stehen musste.
2. Die auf der KLA Linz-Unkel installierte Klärschlammkarbonisierungsanlage konnte nicht mit dem geplanten Durchsatz (132,5 kg/h getrockneter Klärschlamm mit 85 % TR bzw. 125,2 kg/h getrockneter Klärschlamm mit 90 % TR) betrieben werden. Aus den Erfahrungen des Projektverlaufs lag der maximal realisierbare Durchsatz mit der auf der Kläranlage Linz-Unkel installierten PYREG®-Anlage bei knapp 100 kg getrocknetem Schlamm/h mit \geq 90 % TR, d.h. bei ca. 90 kg TM/h. Dieser gegenüber der Planung geringere Durchsatz lag im Wesentlichen darin begründet, dass sich sowohl Wärmetauscher, als auch Abgaswege im Betrieb vermehrt zusetzten. Weiter kühlte die Anlage bei höherem Durchsatz durch das mehr zu verdampfende Wasser im Klärschlamm die Karbonisierungsreaktoren aus. Die beschriebene realisierte Volllast von 90 kg TM/h ließ sich aus den o.a. Gründen nur über einen Zeitraum von ca. 2 Tagen realisieren, danach musste die

Durchsatzleistung stetig reduziert werden, um die Anlage zur Karbonisierung der anfallenden Klärschlammmenge überhaupt in Betrieb zu halten.

Die auf der KLA Linz-Unkel installierte PYREG®-Anlage stellte damit die den Durchsatz auf, wenn überhaupt möglich maximal 90 kg TM/h limitierende Komponente beim geplanten Betrieb der gesamten Klärschlammbehandlungsanlage aus Klärschlamm-entwässerung, Klärschlamm-trocknung und Klärschlammkarbonisierung dar.

2.3.2. Wärmeversorgung

Die Wirtschaftlichkeit der Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammkarbonisierungsanlage der KLA Linz-Unkel wurde wesentlich durch den Preis für die benötigte Wärme zur Klärschlamm-trocknung beeinflusst. Bestenfalls sollte Abwärme – sofern vorhanden – genutzt werden.

Laut Planung sollte die Trocknung der 3,22 m³ Klärschlamm mit 26 % TR bzw. 112,7 kg TM, die stündlich karbonisiert werden sollten, knapp 260 kW benötigen. Davon sollten ca. 100 kW von der auf der KLA bereits vor Projektstart vorhandenen Mikrogasturbine und ca. 160 kW von der PYREG®-Anlage zur Verfügung gestellt werden. Die Wärme sollte in Form von Heizwasser mit 85 - 95 °C (optimal: ca. 90 °C) zur Verfügung gestellt werden (siehe Abbildung in Anhang 1).

Dies konnte nicht erreicht werden. Die Gründe hierfür, die getroffenen Optimierungsmaßnahmen und die Ergebnisse werden nachfolgend beschrieben:

- **Mikrogasturbine**

Auf der Kläranlage Linz-Unkel wurde seit 2011 eine Mikrogasturbine zur Verstromung des Klärgases eingesetzt. Diese wurde vor Installation der Klärschlamm-trocknungsanlage gedrosselt betrieben und konnte auch mit Erdgas betrieben werden.

Bei der Planung der Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammkarbonisierungsanlage wurde von den folgenden Leistungsdaten der Mikrogasturbine ausgegangen:

- Leistung elektrisch: 65 kW, gedrosselt: 50 kW
- Leistung thermisch: 120 kW, gedrosselt: 85 - 90 kW

Nach Inbetriebnahme des Klärschlamm-trockners und der Klärschlammkarbonisierungsanlage wurde die Abwärme der Turbine nicht mehr in die Atmosphäre abgegeben, sondern zusammen mit der Abwärme der PYREG®-Anlage zur Trocknung des Klärschlammes verwendet. Zu diesem Zweck wurde die Drosselung der Mikrogasturbine entfernt. In den sogenannten „Schwachlastzeiten“ (d.h. bei längerem Regen, bei Hochwasser und/oder im Winter), welche in Summe ca. 50 – 60 % des Betriebsjahres ausmachten, ging die Faulgasausbeute der KLA allerdings zurück, sodass der Betrieb der Turbine abweichend von der Planung in dieser Zeit nicht auf dem erforderlichen kontinuierlich hohen Stand gehalten werden konnte. Die hohe Summe der „Schwachlastzeiten“ wurde in der Planungsphase in diesem Umfang nicht

vorhergesehen. Bei Eintreten eines solchen Betriebszustandes gingen deshalb auch der Trockner und die Klärschlammkarbonisierungsanlage in der Leistung zurück. Dies konnte in Schwachlastzeiten auch unter Zuschaltung des mit Erdgas betriebenen Notheizkessels nicht ausreichend ausgeglichen werden, um den Schlammumsatz von mindestens 90 kg TM/h bei > 90 % TR sicherzustellen. Zudem war die Zuschaltung des Notheizkessels nicht wirtschaftlich, weil damit ein fossiler Energieträger rein zur Erzeugung von Wärme verbraucht wurde. Beim Betrieb der Mikrogasturbine mit Erdgas hingegen, wird aus dem fossilen Energieträger Strom erzeugt, der zur Eigennutzung auf der KLA zur Verfügung stehen kann. Gleichzeitig kann die parallel zum Strom erzeugte Abwärme der Turbine genutzt werden. Aus diesem Grund wurde die Turbine 2018 so nachgerüstet, dass seither eine geregelte Erdgasbeimengung erfolgen konnte. Die Beimengung von Erdgas erfolgte vor der Gaskompressionsanlage mit max. 50 %. Der Erdgasbedarf betrug aufgrund des Betriebes des Notheizkessels, sowie der Beimengung in der Mikrogasturbine ca. 85.000 m³/a.

Die detaillierte Kontrolle der Abwärmemengen, die ab der Mikrogasturbine ins Wärmenetz der Kläranlage eingespeist wurden, zeigte aber, dass die der Anlagenplanung zugrunde gelegte Wärmelieferung der Mikrogasturbine von ca. 100 kWh/h dennoch selten erreicht wurde.

Der Anhang 3a - 3c zeigt die direkt an der Mikrogasturbine gemessene Wärmeproduktion. 2020 betrug diese im Durchschnitt nur 57 kWh/h, bei seltenen Spitzenwerten von > 70 kWh/h. Außerdem wurde viel weniger Abwärme ausgekoppelt als aufgrund der durch die Turbine erzeugte Strommenge erwartet werden durfte. Das Verhältnis Abwärme zu Stromproduktion veränderte sich erwartungsgemäß, nachdem der Abgaswärmetauscher der Turbine Anfang 2021 gewartet worden war. Allerdings blieb die Strom- und Abwärmeproduktion auch danach hinter den Erwartungen zurück. Die durchschnittliche Wärmeproduktion der Turbine lag, trotz Erdgas-Beimischung, 2021/22 bei 88 kWh/h resp. 82 kWh/h mit seltenen Spitzen von > 100 kWh/h. Das Heizwasser konnte von der Mikrogasturbine außerdem aufgrund der anlageninternen Regelung der Turbine, die sich nicht verändern ließ, nur mit maximal 84 °C zur Verfügung gestellt werden.

- **Klärschlammkarbonisierungsanlage**

Durch die Karbonisierung in der PYREG®-Anlage konnte deutlich weniger Wärme zurückgewonnen werden, als dies vor Projektstart vom Hersteller angegeben wurde. Bei der Auslegung ging man davon aus, dass aus 112,7 kg Trockenmasse mit 55 % Glühverlust und mindestens 11.000 kJ/kg TM ca. 160 kW Wärme für die Trocknung bereitgestellt werden könnten. Dies entsprach einer Wärmerückgewinnung von ca. 1,42 kWh/kg TM. Die auf der KLA Linz-Unkel gewonnenen Betriebserfahrungen zeigten, dass

mit der dort installierten PYREG®-Anlage ca. 0,8 kWh/kg TM zurückgewonnen werden können (Anhang 4, Betriebsdaten 2021/22, Auswertung). Die Gründe hierfür waren einerseits der Wirkungsgrad der Abgaswärmetauscher in der Klärschlammkarbonisierungsanlage, der geringer war als ursprünglich angenommen, und andererseits vor allem die höheren Energieverluste innerhalb der Anlage aufgrund des Staubfilters, der nach der Inbetriebnahme nachgerüstet werden musste, um den geforderten Emissionsgrenzwert für Staub entsprechend der Genehmigung (10 mg/m³ i.N, tr.) sicher einzuhalten (siehe hierzu Kap. 2.3.3, Abluft- und Abgasemissionen).

Eine Wärmerückgewinnung von ca. 0,8 kWh/kg TM in der PYREG®-Anlage entspräche bei dem ursprünglich geplanten Durchsatz von 112,7 kg TM/h total ca. 90 kWh/h Abwärme, die zur Trocknung des Klärschlamm zur Verfügung stünden.

Da die auf der KLA Linz-Unkel installierte Klärschlammkarbonisierungsanlage aber nur max. 90 kg TM/h an getrocknetem Klärschlamm karbonisieren konnte, konnten bei der Wärmerückgewinnung von ca. 0,8 kWh/kg TM bestenfalls nur maximal ca. 70 kWh/h Wärme aus der Karbonisierung für die Trocknung zurückgewonnen werden. Hiervon waren zusätzlich ca. 12 % Wärmeverluste zwischen der Klärschlammkarbonisierungsanlage und dem Trockner in Abzug zu bringen (Anhang 4, Betriebsdaten 2021/22, Auswertung), d.h. tatsächlich konnte bei ca. 90 kg TM/h, die karbonisiert wurden, mit ca. 60 kWh/h Wärme gerechnet werden, die aus der Karbonisierung am Trockner zur Verfügung standen. Die Wärmerückgewinnung betrug in der Praxis mit ca. 60 kWh/h entsprechend nur ca. 37,5 % der Wärmerückgewinnung, die durch den Anlagenhersteller kalkuliert wurde (160 kWh/h).

- **Wärmenetz**

Klärschlamm-trocknung und Klärschlammkarbonisierung wurden in das bestehende Wärmenetz der Kläranlage mit Mikrogasturbine und Notheizkessel als Wärmelieferanten und Faulurm sowie Betriebsgebäude als den wesentlichen, bereits auf der KLA vorhandenen, Verbrauchern eingebunden.

Nach Inbetriebnahme der größeren Schneckenpresse Anfang 2021 wurde deutlich, dass insbesondere die Hydraulik des Wärmenetzes signifikant verbessert und angepasst werden musste, damit die verfügbare Wärme tatsächlich und vollständig für die Verbraucher nutzbar gemacht werden konnte.

Ersichtlich wurde dies insbesondere an folgenden Faktoren:

- Die Heißwasser-Rücklauftemperatur vom Trockner war permanent zu hoch:
Die Temperaturdifferenz zwischen Heißwasservorlauf zum Trockner und Heißwasserrücklauf vom Trockner betrug statt ca. 20 Kelvin (K) nur ca. 12 K, d.h. die Wärmeabnahme durch den Trockner war zu gering.
- Der im Zuge der Wärmebilanzierung ermittelte spezifische Wärmebedarf der Trocknung wurde mit deutlich unter 600 (!) kWh/t verdampftem Wasser (H₂O)

ermittelt (siehe Kap. 2.6.2) und war für einen stabilen Dauerbetrieb zu niedrig. Der vom Hersteller der Trocknungsanlage gewährleistete spezifische Wärmebedarf lag bei max. 850 kWh/t verdampften Wassers.

- Die Belegung der Lamellenwärmetauscher im Trockner mit Staub nahm nach der Inbetriebnahme der größeren Schneckenpresse und Erhöhung des Durchsatzes massiv zu, so dass die Filter seit Inbetriebnahme der größeren Schneckenpresse statt wie zuvor einmal pro Woche zweimal pro Woche getauscht werden mussten. Es wurde vermutet, dass der Staub stärker an den Lamellen haftet, weil die Trocknerluft aufgrund der schlechten Wärmeversorgung des Trockners rasch überfeuchtet.

Ab September 2021 wurde das bestehende Wärmenetz deshalb von einem Experten überprüft. Die von ihm vorgeschlagenen Optimierungsmaßnahmen beinhalteten die Installation weiterer Wärmemengenmessungen um eine zweifelsfreie Wärmebilanzierung zu ermöglichen.

Die Optimierungsmaßnahmen sollten in 2023 umgesetzt werden und beinhalteten im Wesentlichen die Installation von Blockheizkraftwerken. Hiervon wurde letztlich aufgrund der Investitionskosten, sowie der fehlenden Aussicht auf preisgünstige Prozesswärme abgesehen. Die Gründe sind ausführlich in Kap. 4.2. erläutert.

- **Wärmerückgewinnung aus der Trocknerabluft**

Die Effizienz der Trocknung im installierten Bandtrockner EloDry® erwies sich im Betrieb als besser als geplant. Zum einen wies die Trocknerabluft ein niedrigeres Temperaturniveau auf als ursprünglich vorgesehen (Temperatur Trocknerabluft, Geplant: ca. 70 °C / Ist: ca. 58 °C). Zum anderen arbeitete der in der Trocknerabluft direkt hinter dem Trockner installierte Rekuperator (Wärmerückgewinnungssystem Nr. 1, siehe Abbildung im Anhang 1), der dazu diente, Wärme aus der Abluft in die zugeführte Frischluft des Trockners zu übertragen, sehr effektiv (Temperatur Trocknerabluft hinter Rekuperator, Geplant: ca. 65 °C / Ist: ca. 45 °C). Aus diesem Grund stand in der Trocknerabluft keine Wärme mehr auf einem Temperaturniveau von bis zu ca. 65 °C zur Verfügung, die, wie ursprünglich vorgesehen, für die restlichen Verbraucher der Kläranlage - Faulturm, Betriebsgebäude – hätte genutzt werden können (Wärmerückgewinnungssystem Nr. 2, siehe Abbildung im Anhang 1). Daher wurde das Wärmerückgewinnungssystem Nr. 2 zur Nutzung von Abwärme aus der Trocknerabluft hinter dem Rekuperator im Jahr 2019 außer Betrieb genommen. Gegenüber der Planung stellt das niedrigere Temperaturniveau der Trocknerabluft, sowie das effektivere Wärmerückgewinnungssystem Nr. 1 eine Verschiebung der Wärmemengen dar. Wärme, die in den Verbrauchern der Kläranlage hätte genutzt werden sollen, wurde so im Trockner genutzt.

2.3.3 Abluft- und Abgasemissionen

- **Abluftemissionen aus der Klärschlamm-trocknung**

Die ersten Emissionsmessungen der Trocknerabluft am 13.04.2016 hatten eine Überschreitung der ursprünglich, mit dem Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014, genehmigten Grenzwerte für Gesamt-Kohlenstoff und Geruch ergeben. Daraufhin wurde die Abluftreinigung des Trockners durch eine UV-Oxidationsanlage ergänzt, die hinter dem sauren Wäscher installiert wurde. Zwei Nachmessungen im Laufe des Jahres 2016 ergaben, dass die Grenzwerte der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA-Luft), Fassung vom 24. Juli 2002, damit eingehalten werden konnten (Tabelle 2). Nicht eingehalten wurden jedoch die Grenzwerte des Genehmigungsbescheides der Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord vom 14.02.2014. Auch bei den Nachmessungen im Jahr 2016 waren die Grenzwerte für Gesamt-Kohlenstoff und Ammoniak überschritten. Die im Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014 festgelegten Emissionsgrenzwerte für die Trocknerabluft lagen teilweise deutlich unter den Grenzwerten der TA-Luft, Fassung vom 24. Juli 2002 (vgl. Tab. 1). Mit Antrag vom 09.08.2019 wurde deshalb eine Anpassung der Grenzwerte entsprechend den Vorgaben der TA-Luft bei der Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord in Koblenz beantragt und mit Bescheid vom 30.03.2020 genehmigt (siehe Änderungsgenehmigung, Anhang 5).

Die Grenzwerte gemäß Änderungsgenehmigung vom 30.03.2020 wurden von der auf der KLA Linz-Unkel installierten Anlage eingehalten. Details können Tabelle 2 entnommen werden.

Tab. 2: Ergebnisse der Emissionsmessungen an der Trocknerabluft

Messkomponente	Einheit	Grenzwert gemäß Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014	Grenzwert gemäß Genehmigungsbescheid vom 30.03.2020**	Messergebnis*, Messung vom 13.04.2016	Messergebnis*, Messung vom 16.08.2016	Messergebnis*, Messung vom 22.11.2016	Messergebnis*, Messung vom 11.07.2022
Ges-C	mg/m ³	15	20	27	13	20	19
HCl	mg/m ³	1	20	< 0,3	< 0,3	< 0,4	< 1
NH ₃	mg/m ³	1	20	1	8	2	< 1
Gesamtstaub	mg/m ³	2	10	0,6	1	< 0,2	2
Geruch	GE _E /m ³	400	500	1.400	280	69	410

*angegeben ist jeweils der max. Messwert zzgl. erweiterter Messunsicherheit aus dem Messbericht des beauftragten akkreditierten Prüfinstituts

** Grenzwerte des Genehmigungsbescheides vom 30.03.2020 entsprechen den Grenzwerten der TA Luft 2002

- **Abgasemissionen aus der Klärschlammkarbonisierung**

Da die PYREG[®]-Anlage auf der KLA Linz-Unkel die erste kontinuierlich mit Klärschlamm betriebene Anlage war, lagen noch keine Erfahrungswerte über die Einhaltung der Emissionswerte nach der 17. Bundesimmissionsschutzverordnung (BImSchV) vor. Ursprünglich war man davon ausgegangen, dass der Nasswäscher und das nasse

Festbett des Aktivkohlefilters ausreichend Staubpartikel aus dem Abgas der Anlage entfernen würden. Dies war nicht der Fall, die Messwerte für Gesamtstaub bei Kontrolluntersuchungen durch ein akkreditiertes Prüfinstitut lagen 2016 und 2018 über dem erlaubten Grenzwert (siehe Anhang 6, Übersicht Emissionsmessergebnisse Karbonisierung). Die Einhaltung der Grenzwerte für die weiteren Parameter konnte nachgewiesen werden. Versuche mit einem zusätzlich eingebauten Elektrofilter Typ Carola® der Firma CCA-Carola-Clean-Air GmbH zur Reduktion des Gesamtstaubs im Abgas waren nicht erfolgreich. Letztlich wurde ein Hochtemperatur-Schlauchbeutelfilter (Gewebefilter) der Firma Infastaub GmbH, Typ AJN, nachgerüstet.

Dieser Staubfilter wurde zwischen die beiden Wärmetauscher, vor dem Nasswäscher und dem Festbettaktivkohlefilter, in die Abgasstrecke installiert (Abbildung 9, nicht dargestellt ist der 2. Wärmetauscher / zum Vergleich siehe Abbildung 7).

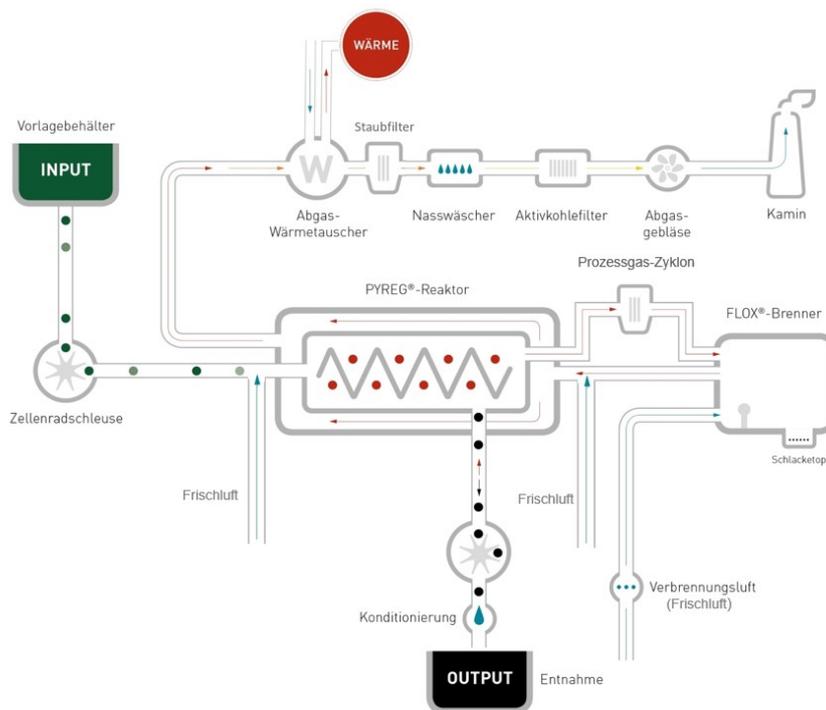


Abb. 9: Vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage nach Installation des Staubfilters

Quelle: PYREG GmbH

Im Verlauf des Jahres 2019 wurden an der Klärschlammkarbonisierungsanlage am Standort der Kläranlage Linz-Unkel an 13 Tagen insgesamt 34 Messungen des Abgases durchgeführt. Der Fokus lag dabei auf der Optimierung der Betriebsweise mit dem Ziel, die Partikelseparation aus dem Abgas durch den Gewebefilter und durch einen, dem Wäscher nachgeschalteten, Lamellen-Demister-Tropfenabscheider zu verbessern. In Abbildung 10 sind die Mittelwerte dieser Messtage dargestellt. Die Fahrweise der Anlage wurde bis zum 03.05.2019 soweit optimiert, bis die Staubemissionen unter dem gesetzlichen Grenzwert von 10 mg/m^3 i.N.tr. gehalten werden konnten. Am 28.05.2019

fürte das IUTA (Institut für Energie- und Umwelttechnik), Duisburg, an der Anlage eine Messkampagne durch, um die Abscheideeffizienz des Gewebefilters einzuschätzen. Anhand der gemessenen hohen Staubkonzentrationen bei dieser Messung (Abbildung 10) wurde darauf geschlossen, dass in den Filtertaschen Leckagen vorhanden sein müssen. Als Ursache hierfür wurde mechanischer Verschleiß ausgemacht.

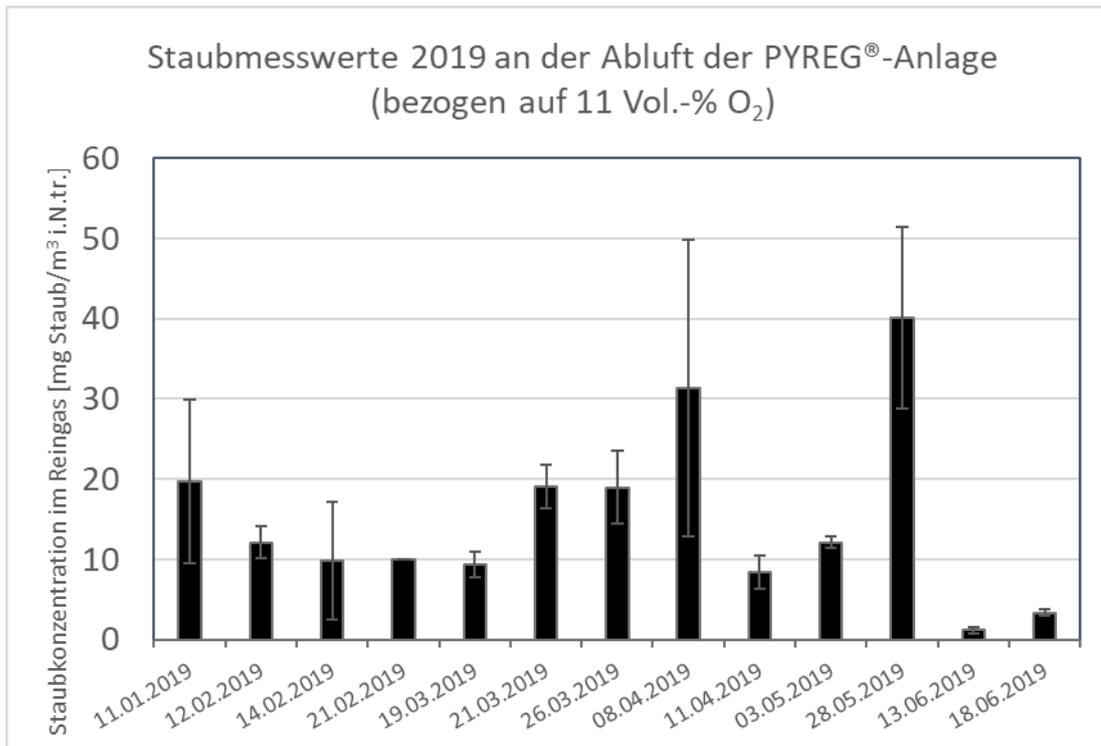


Abb. 10: Staubmesswerte aus dem Abgas der PYREG®-Anlage 2019

In Folge dessen wurden die Filtertaschen durch neue ersetzt und es wurde am 13.06.2019 mit denselben Betriebsparametern eine weitere interne Messung durchgeführt. In Kombination mit den zuvor staubemissionstechnisch optimierten Anlageneinstellungen konnten an diesem Tag Partikelkonzentrationen im Kamin weit unter dem gesetzlichen Grenzwert erzielt werden. Diese Messergebnisse wurden durch den TÜV Rheinland (akkreditiertes Prüfinstitut) am 18.09.2019/19.09.2019 bestätigt (siehe Anhang 6 / Messverfahren: Ermittlung der Staubmassenkonzentration bei geringen Staubgehalten, manuelles gravimetrisches Verfahren gemäß DIN EN 13284, Teil 1, Februar 2018).

Anhand dieser Erfahrungen wurde abgeleitet, dass die Filtertaschen im Intervall von ca. 2 Jahren getauscht werden müssen.

Darüber hinaus wurden etliche weitere Optimierungsmaßnahmen im Bereich der Abgasnachbehandlungsanlage an der Karbonisierungsanlage durchgeführt:

- die Änderung der Porengeometrie im Kantenspaltfilter für Washwasser
- die Änderung des Tropfenabscheiders von Mesh-Gewebe auf Drall-Fliehkraftabscheider

- die Fertigung der Abgaswege in Kunststoff
- der Ersatz der Kondensat-Schlauchpumpen durch Verdränger-Drehkolbenpumpen
- der Ersatz des Koaxial Hochtemperatur (HT) Abgas-Rohrwärmetauschers durch einen Rohrbündel-Wärmetauscher
- die Modifikation des FLOX®-Brenners zur verbesserten Abgas-Rezirkulation
- der Ersatz der elektrisch gesteuerten Abschlämmeinrichtung des Abgaswäschers durch eine pneumatisch gesteuerte Komponente
- die Optimierung des Wärmekreislaufes durch digital extern ansteuerbare Komponenten (Pumpen, Mischer)
- die Neufertigung des Abgasgebläses und des Abgasrezirkulationsgebläses aus extrem korrosionsbeständigen Edelstahllegierungen
- der Ersatz des Niedertemperatur-Abgaswärmetauschers der Fa. Bomat durch einen Rohrbündelwärmetauscher

Nach Erledigung dieser Umbauarbeiten wurden weitere Emissionsmessungen durchgeführt.

Bei der Messung im September 2021 konnte der im Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014 geforderte Grenzwert für Gesamtstaub nicht eingehalten werden (Messwert: 31 mg/m³, Grenzwert: 10 mg/m³). Die Filtertaschen wurden daraufhin erneuert. Bei der Messung im Juli 2022 wurde der Grenzwert für Staub eingehalten, allerdings lag der NO_x-Wert über dem Grenzwert (Messwert: 228 mg/m³, Grenzwert: 200 mg/m³). Der Grund hierfür ließ sich nicht feststellen. Mit Bescheid vom 17.10.2022 wurde eine Nachmessung angeordnet; diese ist bislang – aufgrund des Abschaltens der Anlage im Rahmen der Vorbereitungen zur Gasmangellage im Jahr 2022 in Folge des Ukraine Krieges - nicht erfolgt. Die Ergebnisse der Emissionsmessungen sind in der Übersicht im Anhang 6 aufgeführt.

Abbildung 11 zeigt schematisch die, Ende des Jahres 2022 beim Abschalten der Klärschlammbehandlungsanlage, nach Abschluss aller Optimierungen tatsächlich installierten, wesentlichen Anlagenkomponenten (zum Vergleich siehe Abbildung 1).

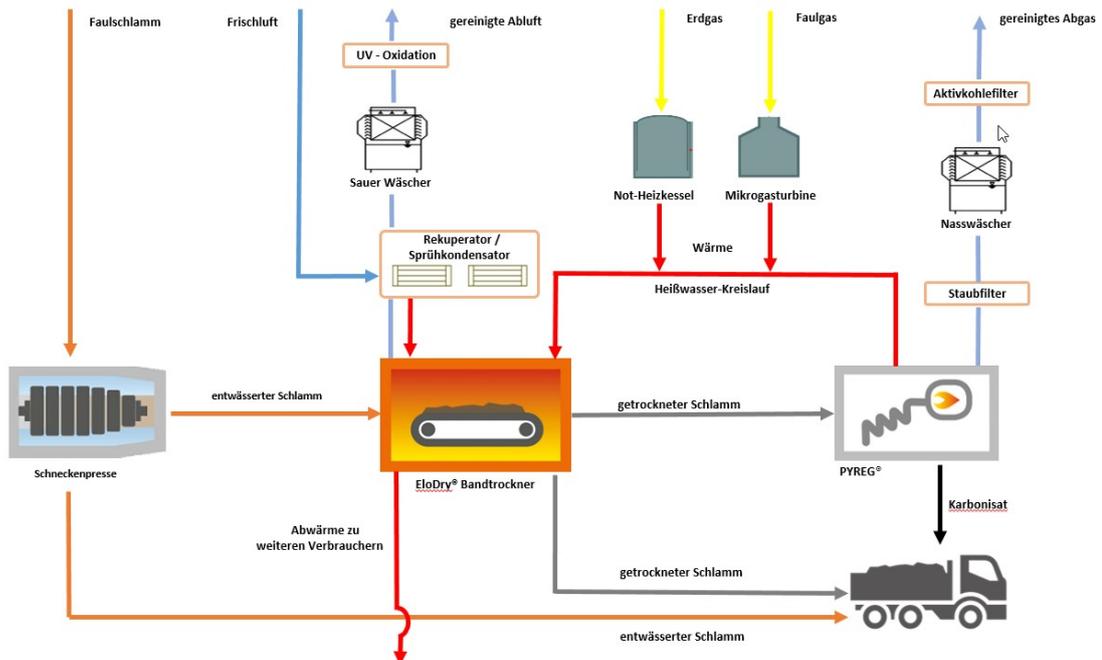


Abb. 11: Tatsächlich installierte wesentliche Anlagenkomponenten der Klärschlammbehandlungsanlage beim Abschalten Ende des Jahres 2022

In Abbildung 12 ist der Vergleich der kalkulierten Stoff- und Wärmeströme zum Zeitpunkt der Projektplanung, sowie nach den in Kap. 2.3. geschilderten Erfahrungen und der durchgeführten Anlagenoptimierung dargestellt (vgl. Anhänge 1 und 7). Im Anhang 7 sind die Stoff- und Wärmeströme der installierten Klärschlammbehandlungsanlage dargestellt, die sich beim Ausschalten der Anlage Ende 2022 bestenfalls realisieren ließen.

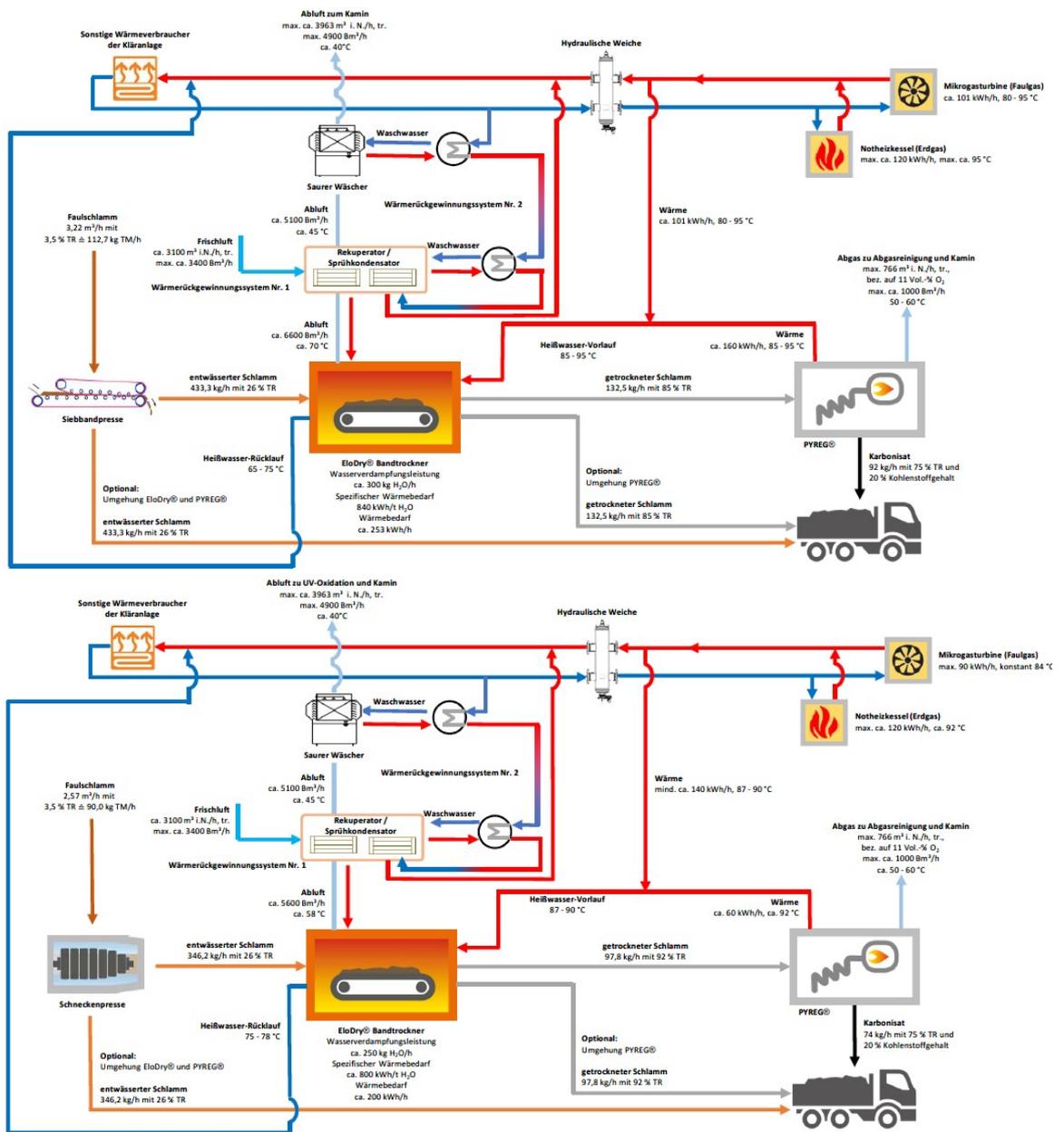


Abb. 12: Vergleich kalkulierte Stoff- und Wärmeströme geplant (oben) und nach Optimierung (unten)

Der Vergleich zwischen der Planung und der Umsetzung der Klärschlammbehandlungsanlage aus den Prozessschritten Entwässerung, Trocknung und Karbonisierung zeigt zwei wesentliche Unterschiede auf:

- Aufgrund des gegenüber der Planung geringeren Durchsatzes durch die Anlage muss sie länger betrieben werden, damit der jährlich anfallende Schlamm komplett entwässert, getrocknet und karbonisiert werden kann. Der zeitliche Mehraufwand beträgt + ca. 25 %, d.h. für die Behandlung von ca. 563,4 TM/a muss die Anlage statt der geplanten 5.000 Bh/a ca. 6.250 Bh/a betrieben werden, was unter Beachtung der im Projektverlauf festgestellten notwendigen Reinigungs- und Wartungsintervalle einen dauerhaften 24/7 Betrieb mit Personalwesenheit erforderlich macht.

- Aufgrund der geringeren Wärmeleistung der PYREG[®]-Anlage und der Mikrogasturbine wird für die Trocknung zusätzlich Wärme aus der Verbrennung von Erdgas im Notheizkessel benötigt (mind. ca. 50 kWh/h).

2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)

Am 29.10.2013 wurde vom Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel über die Ingenieurgesellschaft Dr. Siekmann + Partner mbH, Simmern, bei der zuständigen Genehmigungsbehörde, der Struktur- und Genehmigungsdirektion Nord (SGD Nord), Koblenz, der Antrag auf Neugenehmigung zur Errichtung und zum Betrieb einer thermischen Klärschlammbehandlungsanlage auf der Kläranlage in Linz-Unkel gemäß §§ 4, 19 BImSchG gestellt.

Die thermische Schlammbehandlungsanlage auf der KLA Linz-Unkel war entsprechend dem Anhang 1 der 4. Verordnung zur Durchführung des BImSchG (4. BImSchV) folgenden Anlagenarten zuzuordnen:

1. Anlage der Nr. 8.11.2.4 zur Schlammentwässerung mit einer Durchsatzkapazität von bis zu 100 t/d
2. Anlage der Nr. 8.10.2.2 zur Klärschlamm-trocknung mit einer Durchsatzkapazität von bis zu 12 t/d
3. Anlage der Nr. 8.1.1.4 zur Karbonisierung des Klärschlammes in Form thermischer Behandlung mit einer Durchsatzkapazität bis zu 140 kg/h.

Beantragt wurde die Anlage zur Entwässerung, Trocknung und Karbonisierung des auf der KLA Linz-Unkel anfallenden Faulschlammes wie in Abbildung 1 bzw. im Anhang 1 dargestellt und in Kap. 2.2. beschrieben, mit einer Siebbandpresse als Schlammentwässerungsaggregat. Die Genehmigung hierzu wurde am 14.02.2014 erteilt (Genehmigungsbescheid, Anhang 2). Die erforderliche Baugenehmigung nach Landesbauordnung (LBauO) und die wasserrechtliche Genehmigung nach § 54 Wassergesetz des Landes Rheinland-Pfalz (Landeswassergesetz - LWG) waren entsprechend § 13 BImSchG in der Genehmigung nach BImSchG eingeschlossen.

Die im Zuge der Projektrealisierung und -optimierung erforderlichen Anlagenanpassungen wurden der Behörde angezeigt. Sofern durch die Behörde eine Genehmigung gefordert wurde, wurde die Genehmigung der erforderlichen Anlagenanpassungen beantragt.

Zu den genehmigungspflichtigen und mit Änderungsgenehmigung vom 30.03.2022 genehmigten Anlagenanpassungen (Anhang 5) gehörten insbesondere:

- Bauliche Änderungen am Schlammbehandlungsgebäude, vor allem
 - die Herstellung des Schlammbehandlungsgebäudes in Massiv- statt in Skelettbauweise, da sich die Massivbauweise gegenüber der Skelettbauweise als energetisch günstiger herausstellte und der Massivbauweise für spätere Umbaumaßnahmen Vorteile hinsichtlich Einfachheit und Preis zugeschrieben wurden.
 - die Verkleinerung der Bühnenkonstruktion und damit verbunden des Schaltraums im 1. Obergeschoss des Schlammbehandlungsgebäudes. Die verkleinerte Bühne erwies sich im Zuge der Detailplanung als ausreichend für die

Aufstellung der Schneckenpresse und der Installation des Schaltraums.

- die Anpassung von Zu- und Abluftöffnungen für die Gebäudelüftung.
 - die Änderung der Lage des Schornsteins für die Trocknerabluft.
 - der Einbau eines Sektionaltores im Schlammbehandlungsgebäude statt einer doppelflügeligen Tür als Haupteingang, sowie einer weiteren doppelflügeligen Tür im Obergeschoss des Schlammbehandlungsgebäudes im Bereich des Entwässerungsaggregats für Montage- und Revisionszwecke.
- Die Installation einer Schneckenpresse statt einer Siebandpresse für die Schlamm-entwässerung. Die Gründe sind in Kap. 2.2.1 dargestellt.
 - Die Optimierung der Abluftbehandlung des Trockners durch die zusätzliche Installation einer UV-Anlage zur Gewährleistung der sicheren Einhaltung der für die Trocknerabluft einzuhaltenden Grenzwerte.
 - Die Erhöhung der Grenzwerte für die Trocknerabluft durch Anpassung an die Grenzwerte der TA-Luft (Fassung vom 24.07.2002). Weitergehende Informationen hierzu sind in Kap. 2.3.3 wiedergegeben.
 - Der Bau einer Erdgasleitung für die Erdgasversorgung der Klärschlammbehandlungs-anlage.
 - Die bauliche Anpassung des Containers für die Klärschlammkarbonisierungsanlage und die Lage des Schornsteins für deren Abgas.
 - Der Einbau eines Staubfilters (Gewebefilters) in die Abgasnachbehandlungsstrecke der Klärschlammkarbonisierungsanlage. Die Gründe hierfür sind in Kap. 2.3.3 aufgeführt.

Folgende Anlagenanpassungen wurden der Genehmigungsbehörde angezeigt, mit Bescheid vom 21.07.2022 als nicht genehmigungspflichtig eingestuft und auf der KLA umgesetzt:

- Der Austausch der ursprünglich installierten Schneckenpresse gegen ein größeres Aggregat. Die Gründe für den Austausch sind in Kap. 2.2.1 dargestellt.
- Die Installation einer Enthärtungsanlage zur Versorgung insbesondere des Rekuperators/Sprühkondensators mit entkalktem Wasser.

Im Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014 (Anhang 2) und der Änderungsgenehmigung vom 30.03.2020 (Anhang 5) wurden insbesondere die folgenden Anforderungen an die neue Klärschlammbehandlungsanlage gestellt:

- Die Klärschlammbehandlungsanlage war vor Aufnahme des Betriebs und alle 3 Jahre wiederkehrend einer sicherheitstechnischen Prüfung durch einen Sachverständigen im Sinne des § 29a BImSchG zu unterziehen.
- Für alle anfallenden Abfälle waren der Genehmigungsbehörde (SGD Nord) Annahmebestätigungen von Entsorgern vorzulegen.
- Vom Karbonisat war der SGD Nord spätestens 6 Monate nach Inbetriebnahme der Anlage eine Deklarationsanalyse mit dem Parameterumfang gemäß Deponieverordnung, Deponieklasse 2 (DepV, DK II) und Düngemittelverordnung (DüMV), Anlage

2, Tab. 1.4., zur Einstufung des Abfalls vorzulegen.

- Für alle anderen festen Abfälle war ein Jahr nach Inbetriebnahme der Anlage eine Deklarationsanalyse auf Schwermetalle, (Parameterumfang gemäß DepV) zur Festlegung des Abfallschlüssels vorzulegen.
- Die Grenzwerte für die Emissionen aus der Abluft des Klärschlammrockners wurden wie in Kap. 2.3.3. beschrieben und in Tabelle 2 dargestellt festgelegt. Die Abluftemissionen mussten erstmals 6 Monate nach Inbetriebnahme der Anlage und dann wiederkehrend alle 3 Jahre ermittelt werden.
- Die Grenzwerte für die Emissionen aus dem Abgas der Klärschlammkarbonisierungsanlage wurden wie in Kap. 2.3.3. beschrieben und im Anhang 6 dargestellt festgelegt. Die Abgasemissionsmessungen mussten nach der vollständigen Inbetriebnahme der Anlage über einen Zeitraum von 12 Monaten alle drei Monate und dann wiederkehrend alle 12 Monate durchgeführt werden.
- An der Klärschlammkarbonisierungsanlage mussten zusätzlich die folgenden Parameter kontinuierlich ermittelt, registriert und ausgewertet werden:
 - die Massenkonzentration an Kohlenmonoxid im Abgas,
 - der Volumengehalt an Sauerstoff im Abgas,
 - die Verbrennungstemperaturen,
 - sowie die zur Beurteilung des ordnungsgemäßen Betriebs erforderlichen Betriebsgrößen, insbesondere Abgastemperatur, Abgasvolumen, Feuchtegehalt, Differenzdrücke und pH-Werte.

Die Karbonisierungsanlage wurde mit den erforderlichen Messungen und dem notwendigen Protokollierungssystem ausgestattet.

- Es war ein Betriebstagebuch mit Aufzeichnung der wesentlichen Daten zum Anlagenbetrieb zu führen, insbesondere
 - Art, Menge und Herkunft des Input-Materials,
 - Art, Menge, Qualität und Verbleib der Abfälle (inkl. Karbonisat),
 - Art und Menge der eingesetzten Hilfsstoffe,
 - Menge und Verbleib des anfallenden Abwassers,
 - beanstandete Anlieferungen, getroffene Maßnahmen,
 - besondere Vorkommnisse, vor allem Betriebsstörungen einschließlich Ursachen und Abhilfemaßnahmen.

Diese Daten waren der SGD Nord außerdem innerhalb von drei Monaten nach Ablauf eines Kalenderjahres als Jahresübersicht vorzulegen.

2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten

Für die Erfolgskontrolle der neuen Klärschlammbehandlungsanlage wurden alle relevanten Betriebsdaten erfasst, überprüft und ausgewertet.

Hierzu gehörten insbesondere

- die Stoffströme und die Stoffqualität, z.B. die Menge des Klärschlamm, der der Schlammbehandlungsanlage zufließt,
- die Wärmeströme und das Wärmeniveau,
- sowie alle relevanten verfahrens- und anlagentechnischen Kenndaten der Entwässerung, Trocknung und Karbonisierung.

Soweit möglich erfolgte die Datenerhebung und -auswertung automatisiert und kontinuierlich über an den Anlagen installierte Messungen und durch Vergleich der Messergebnisse mit den Soll-Vorgaben. Diese Daten wurden elektronisch im Prozessleitsystem der Klärschlammkarbonisierungsanlage, der Klärschlammbehandlungsanlage oder im zentralen Leitsystem der KLA abgelegt.

Daten, die nicht automatisiert erfasst, ausgewertet und aufgezeichnet wurden, wurden manuell im Betriebstagebuch der KLA dokumentiert. Hierzu gehörten alle im Labor ermittelten Daten sowie regelmäßige stichprobenartige, individuelle Kontrollen von Messungen und Messergebnissen, die ansonsten automatisch erfasst wurden.

Die Auswertung erfolgte im Anschluss an die Messung bzw. in der Regel zumindest monatlich.

Die Untersuchungen des entwässerten und des getrockneten Klärschlammes sowie des Karbonisats und die Auswertung erfolgten durch Umwelt-Labore der AGROLAP GROUP.

Mit den Emissionsmessungen und Auswertungen der Trocknerabluft bzw. dem Abgas der Karbonisierungsanlage wurden akkreditierte Prüfinstitute (Müller-BBM GmbH, München, bzw. TÜV Rheinland Energy GmbH, Köln) beauftragt.

2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms

Nach den Vorgaben des Zuwendungsbescheids der KfW auf der Grundlage des Umweltinnovationsprogramms vom 08.09.2014 waren folgende Mess- und Betriebsdaten, zusätzlich zu den Mess- und Betriebsdaten aufgrund der Genehmigungsbescheide, zu erfassen:

2.6.1 Massenbilanz für Klärschlamm und Asche

Laut Zuwendungsbescheid sollte vierteljährlich eine Massenbilanz für Klärschlamm und Asche (hier, aufgrund der thermischen Behandlung des Klärschlammes im PYREG®-Reaktor, korrekt: Klärschlammkarbonisat) erstellt werden. In Abbildung 13 sind die Stoffströme schematisch dargestellt.

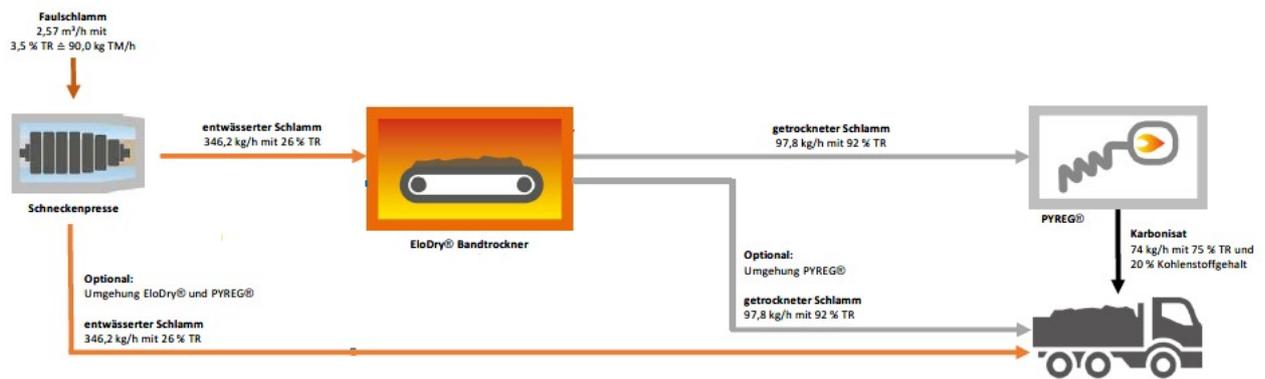


Abb. 13: Schema der Stoffströme der Klärschlammbehandlung

Der ausgefaulte Schlamm wird mittels Schneckenpresse auf ca. 20 – 25 % TR entwässert, bevor er im Niedertemperatur-Bandrockner auf den erforderlichen Trocknungsgrad von ca. 80 – 90 % TR für die Klärschlammkarbonisierung getrocknet wird. Das Endprodukt des Prozesses ist Karbonisat mit ca. 80 – 90 % TR.

Abweichend von den Bedingungen des Zuwendungsbescheides wurde die Massenbilanz monatlich (statt: dreimonatlich) erhoben. Sie kann für die Jahre 2019 und 2020 exemplarisch den Tabellen 3 und 4 entnommen werden.

Tab. 3: Massenbilanz für Klärschlamm / Klärschlammkarbonisat 2019

Klärschlammbilanz Jahr 2019			Betriebsstunden 4.540 h			
	Entwässerung		Trocknung		Karbonisierung	
	Ein 2,3-2,7 % TR [t]	Aus 21-24 % TR [t]	Ein 21-24 % TR [t]	Aus 80-90 % TR [t]	Ein 80-90 % TR [t]	Aus 80-90 % TR [t]
Jan	1147	121	121	35	23,8	11,9
Feb	1048	114	114	33	22	11
Mrz	1069	116	116	34	17,8	8,9
Apr	1118	122	122	35	19	9,5
Mai	1154	125	125	36	27,8	13,9
Jun	1393	151	151	44	32,8	16,4
Jul	1628	177	177	51	35,2	17,7
Aug	1346	146	146	42	28,7	14,4
Sep	1228	134	134	39	27,4	13,7
Okt	1122	122	122	35	27,6	13,8
Nov	1189	129	129	37	28,7	14,5
Dez	1121	122	122	35	31,2	15,6
ges.	14563	1579	1579	456	322	161,3
ges. TR, t	ca. 364	ca. 355	ca. 355	ca. 355	ca. 274	ca. 137**
** diese Werte sind fehlerhaft / zu niedrig						
angefallene Schlammmenge 2019			davon entsorgte Schlammmenge 2019			
	TR	t	t			
von der KLA entwässerter Klärschlamm	21-24 %	1579				
von Lohnentwässerern entw. Schlamm	20 %	255,3	255,3			
getrockneter Schlamm, ges.	75-90 %	456				
getr. Schlamm zur PYREG®-Anlage	80-90 %	322				
getrockneter Schlamm, Rest / davon zwischengelagert	75-90 % 75-90 %	134 14,7	119,3			
Karbonisat	80-90 %	161,3	161,3			
			ges.	535,9		

Tab. 4: Massenbilanz für Klärschlamm / Klärschlammkarbonisat 2020

Klärschlamm Bilanz Jahr 2020			Betriebsstunden 2351 h			
	Entwässerung		Trocknung		Karbonisierung	
	Ein 3,4-3,6 % TR [t]	Aus 21-24 % TR [t]	Ein 21-24 % TR [t]	Aus 80-90 % TR [t]	Ein 80-90 % TR [t]	Aus 80-90 % TR [t]
Jan	1200	183	183	47	22,96	11,48
Feb	894	136	136	35	15,13	7,56
Mrz	1109	169	169	43	19,01	9,51
Apr	1051	160	160	41	15,66	7,83
Mai	1038	158	158	40	17,75	8,87
Jun	1075	164	164	42	10,74	5,37
Jul	1173	179	179	46	16,89	8,45
Aug	964	147	147	37	3,31	1,66
Sep	1068	163	163	42	8,67	4,34
Okt	944	144	144	37	12,74	6,37
Nov	591	90	90	23	9,27	4,64
Dez	682	104	104	27	15,36	7,68
ges.	11789	1797	1797	460	167,5	83,75
ges. TR, t	ca. 412	ca. 404	ca. 404	ca. 404	ca. 142	ca. 71**
** diese Werte sind fehlerhaft / zu niedrig						
angefallene Schlammmenge 2020			davon entsorgte Schlammmenge 2020			
	TR	t	t			
von der KLA entwässerter Klärschlamm	21-24 %	1797				
von Lohnentwässerern entw. Schlamm	20 %	0				
getrockneter Schlamm, ges.	75-90 %	460				
getr. Schlamm zur PYREG®-Anlage	80-90 %	167,5				
getrockneter Schlamm, Rest / davon zwischengelagert	75-90 % 75-90 %	292,5 67,9	224,65			
Karbonisat	80-90 %	83,75	83,75			
			ges. 308,4			

Die Zahlen der Tabellen 3 und 4 zeigen den Anfall an entwässertem Klärschlamm der Jahre 2019 und 2020 und das Ergebnis von Trocknung und Karbonisierung.

In beiden Jahren stand auf der Kläranlage noch die nach Projektstart installierte kleinere Schneckenpresse für die Entwässerung des Schlammes zur Verfügung. Diese musste, um einen TR im entwässerten Schlamm von 21- 24 % zu erzielen, mit einem relativ geringen Durchsatz von lediglich 2 - 2,5 m³/h betrieben werden. Der erwartete, gute Abscheidegrad der Presse von ca. 98 % wurde dabei stets eingehalten. Da der zu entwässernde Schlamm 2019 nur sehr niedrig konzentriert, mit 2,3 - 2,7 % TR, anfiel und die Speicherkapazität der KLA nicht ausreichte, musste ein Teil des auf der KLA anfallenden Schlammes über eine mobile Schlamm-entwässerungsanlage, d.h. durch einen Lohnentwässerer, entwässert werden.

Die Zahlen der Tabellen zeigen auch, dass der 2019 und 2020 auf der KLA entwässerte Schlamm vollständig auf der KLA getrocknet werden konnte.

Allerdings konnte die Karbonisierungsanlage nicht ausreichend stabil betrieben werden. Mit der Anlage wurden in beiden Jahren deutlich weniger als die vom Hersteller angegebenen bis zu max. 7.500 Bh/a bei Volllastbetrieb erreicht. Aus diesem Grund konnte nur ein Teil des getrockneten Schlammes karbonisiert werden, ein Teil musste in getrockneter Form entsorgt werden und ein (kleinerer) Teil des getrockneten Schlammes wurde zwischengelagert. Letzterer wurde vom Kläranlagenpersonal portionsweise manuell wieder in den Vorlagebehälter der Karbonisierungsanlage eingebracht, sofern der Anlagenbetrieb stabil lief und die anfallende, frisch getrocknete Menge an Schlamm eine Ergänzung durch das „alte“, zwischengelagerte trockene Material zuließ.

Die in den Tabellen 3 und 4 angegebenen Mengen an erzeugtem Karbonisat sind fehlerhaft, sie sind zu niedrig. Dies hat folgenden Grund: Bei Stillstand der Karbonisierungsanlage wurde die Trocknung üblicherweise weiter betrieben. Der getrocknete Klärschlamm wurde dann zwar grundsätzlich in einem eigenen Container, getrennt vom Karbonisat, gesammelt, die Container auf der KLA Linz-Unkel mussten aber manuell umgesetzt werden. Um sortenreines Karbonisat sicherzustellen, erfolgte das Umsetzen des Containers insbesondere nach einem Wiederanfahren der Karbonisierungsanlage erst, wenn alle Reste an getrocknetem Schlamm sicher aus dem System ausgetragen worden waren. Aus diesem Grund entsprechen die in den Tabellen 3 und 4 angegebenen Mengen an erzeugtem Karbonisat, die durch Auswiegen des Inhalts des Karbonisat-Containers ermittelt wurden, nicht den tatsächlich erzeugten Mengen; sie sind um den Anteil, der als „Karbonisat-getrockneter Klärschlamm-Mischprodukt“ in den Schlammcontainer ausgetragen wurde, zu gering. Entgegen der Kalkulationsgrundlage der Anhänge 1 und 7, bei denen in der Karbonisierungsanlage ca. 61 % der Klärschlammmenge TR in Karbonisat TR umgewandelt werden, beträgt das Verhältnis aus Karbonisat TR und Klärschlammmenge TR bezogen auf den Verfahrensschritt der Karbonisierung sowohl 2019, als auch 2020 ca. 50 %.

2.6.2 Energiebilanz der Klärschlammbehandlung, inklusive Trocknung und thermischer Behandlung im PYREG®-Reaktor

Die Energiebilanz der Klärschlammbehandlungsanlage, inklusive Trocknung und thermischer Behandlung in der Karbonisierungsanlage, sollte laut Zuwendungsbescheid vierteljährlich erstellt werden.

Die wesentlichen Wärme- und Stoffstromdaten wurden im Leitsystem erfasst und rückwirkend für ca. 1 Jahr gespeichert und darüber hinaus regelmäßig, d.h. zumindest an jedem Arbeitstag (in der Regel von Montag bis Freitag), vom Kläranlagenpersonal überprüft und protokolliert.

Die Auswertung erfolgte in der Regel monatlich, ab ca. 2019 in einer Tabelle, in der alle relevanten Daten zusammengeführt und beurteilt wurden. Die Tabelle wurde fortlaufend optimiert. Die Daten von 2021/22 sind im Anhang 4 beigelegt.

Besondere Schwierigkeiten der wärmetechnischen Bilanzierung lagen wesentlich darin begründet, dass nach der Anlageninstallation, ab ca. Anfang 2016, zunächst viel Zeit investiert werden

musste, um ein geregeltes Zusammenspiel der verschiedenen Anlagenkomponenten – Schneckenpresse, Trockner, Karbonisierungsanlage und Wärmeversorgung – zu erreichen. Besonders schwierig wurde dies durch häufige Anlagenausfälle und -stillstände der Karbonisierungsanlage, sowie durch die Probleme mit der Wärmebereitstellung durch die Mikrogasturbine.

Wesentliche anlagentechnische Erkenntnisse der Jahre 2016/17 waren, dass

- der getrocknete Klärschlamm auf mind. 90 % Trockenrückstand getrocknet werden musste, damit ein stabiler Betriebszustand der Karbonisierungsanlage erreicht werden konnte.
- die Mikrogasturbine um eine Erdgasbeimengung (bis zu 50 % Beimengung) nachgerüstet werden musste.
- die Trocknerabluft nach dem Rekuperator auf einem zu niedrigen Temperaturniveau anfiel, als dass sich hieraus noch Abfallwärme für die sonstigen Verbraucher der KLA (Faulturm, Betriebsgebäude) zurückgewinnen ließ.

Nach erfolgter Nachrüstung der Mikrogasturbine zur entsprechenden Erdgasbeimengung blieben weiterhin die Probleme mit den häufigen Anlagenausfällen der PYREG®-Anlage. Darüber hinaus wurde die Leistung der Klärschlamm-trocknung und Klärschlammkarbonisierung durch die eingesetzte Schneckenpresse auf einen Durchsatz von ca. 60 - 70 kg TM/h reduziert. 2018/19 konnten dennoch wiederkehrend stabile Betriebszustände erreicht werden, die auch graphisch ausgewertet werden konnten. Diese finden sich in den nachfolgenden Diagrammen der Abbildungen 14-16 (26. Nov 2018 – 04. Dez 2018), 17-19 (11. Apr 2019 – 25. Apr 2019) und 20-22 (07. Aug 2019 – 19. Aug 2019).

Diese Abbildungen zeigen für drei verschiedene Zeiträume der Jahre 2018 und 2019 jeweils

- den Schlamm-durchsatz durch den Klärschlamm-trockner,
- den thermischen Energieeintrag in die Trocknung, d.h. die Wärme, die dem Trockner im selben Zeitraum zugeführt wurde und
- den aus dem Schlamm-durchsatz und dem thermischen Energieeintrag in die Trocknung ermittelten spezifischen Wärmebedarf des Trockners im betreffenden Zeitraum.

In die Diagramme ist jeweils eine Trendlinie eingefügt, die den Durchschnittswert erkennbar macht.

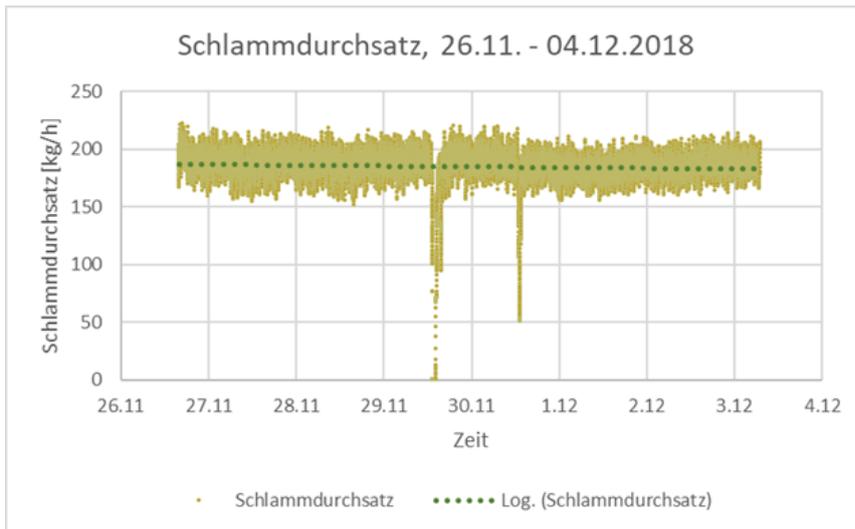


Abb. 14: Schlammurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018

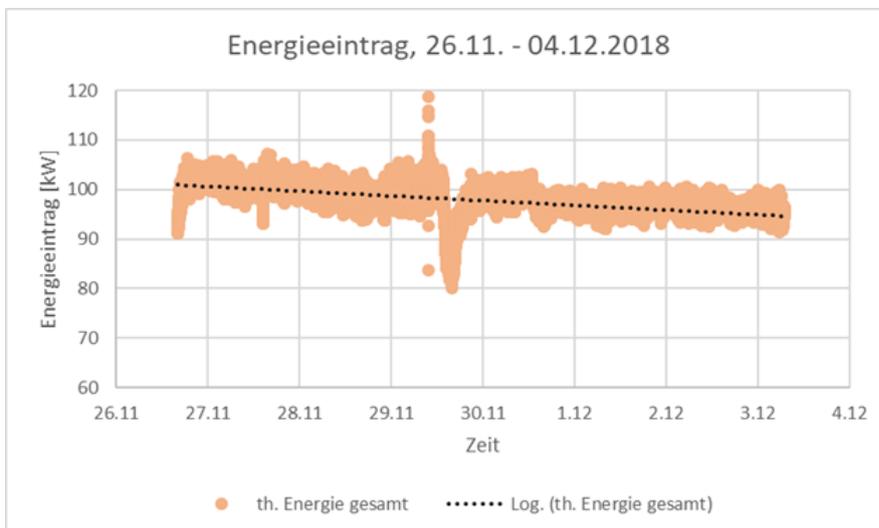


Abb. 15: Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018

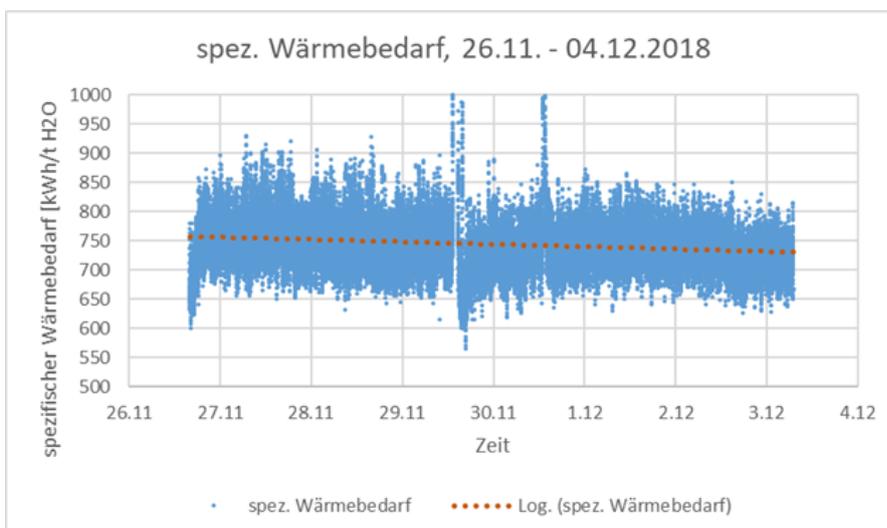


Abb. 16: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018

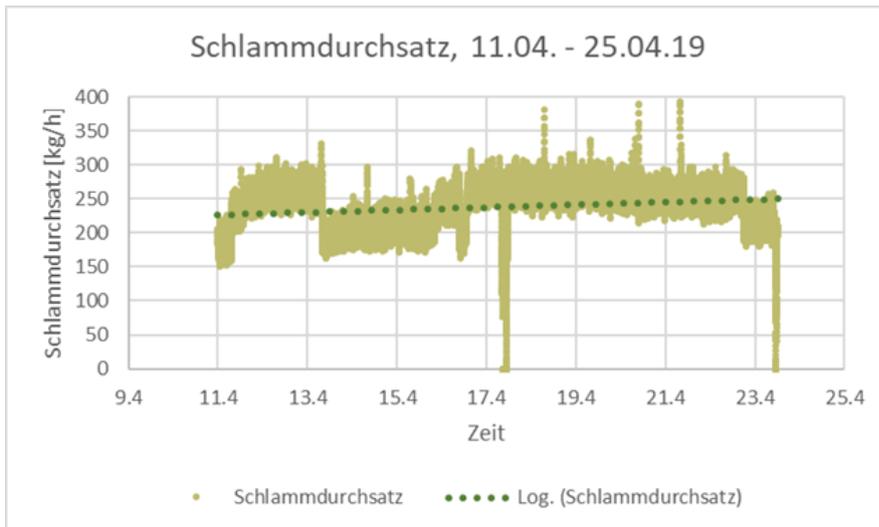


Abb. 17: Schlamm durchsatz durch den Klärschlamm trockner im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019

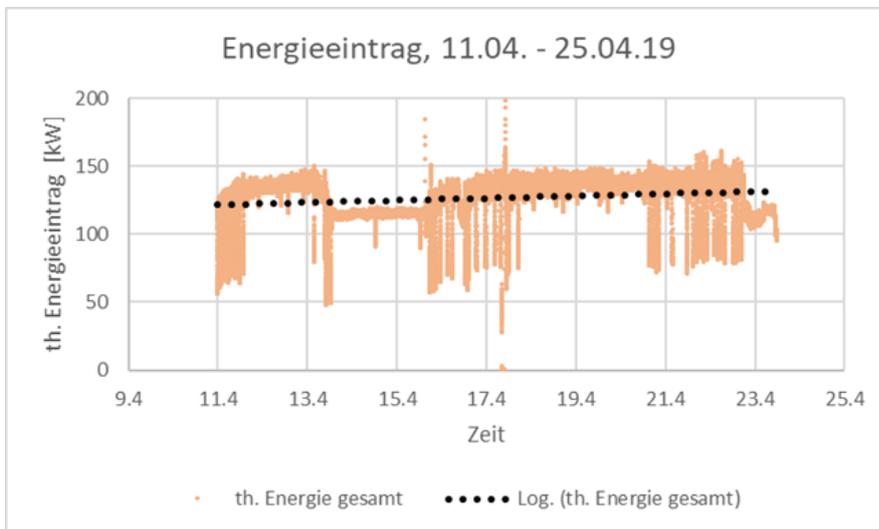


Abb. 18: Wärmeenergie eintrag in die Klärschlamm trocknung im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019

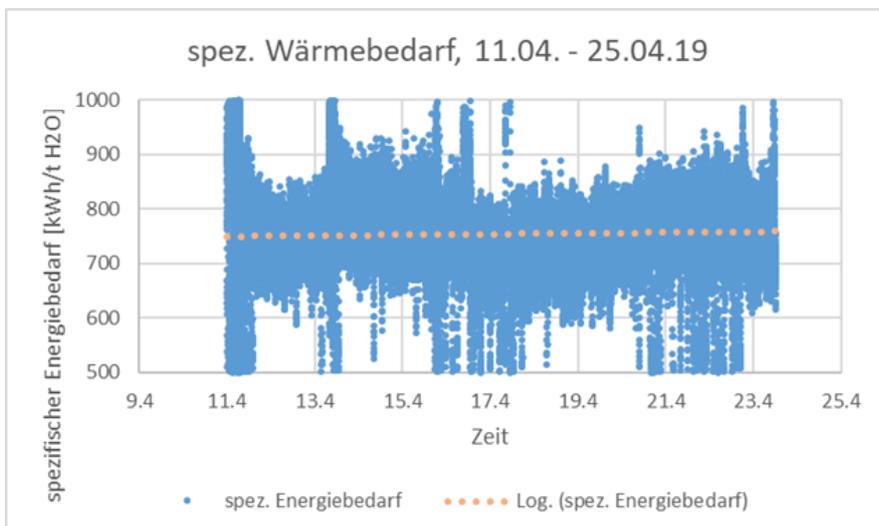


Abb. 19: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm trockners im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019

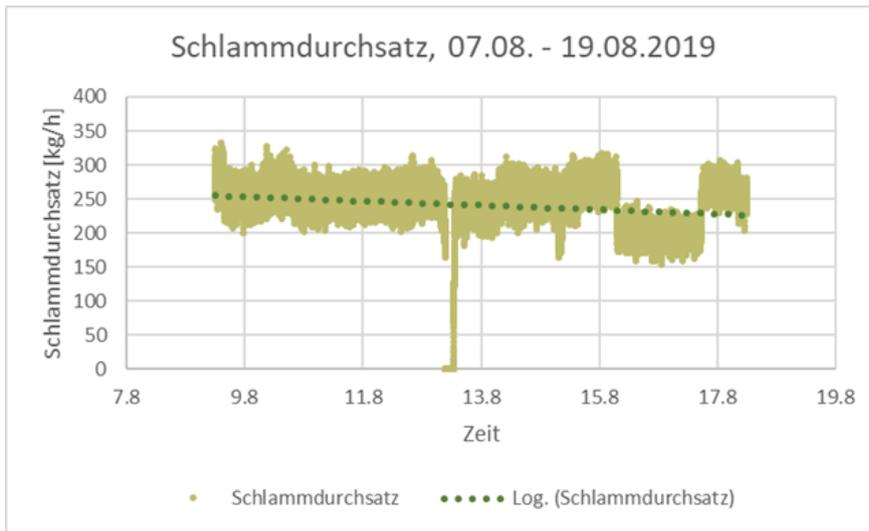


Abb. 20: Schlammumsatz durch den Klärschlamm Trockner im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019

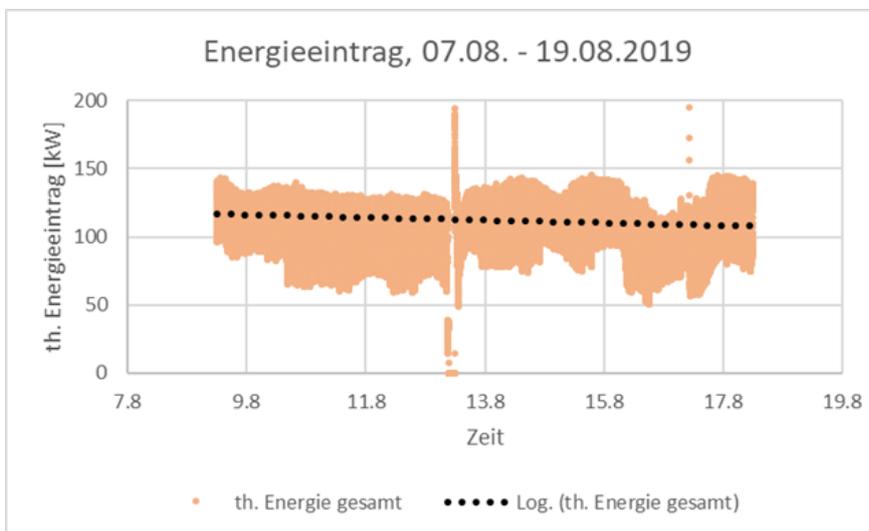


Abb. 21: Wärmeenergieeintrag in die Klärschlamm Trocknung im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019

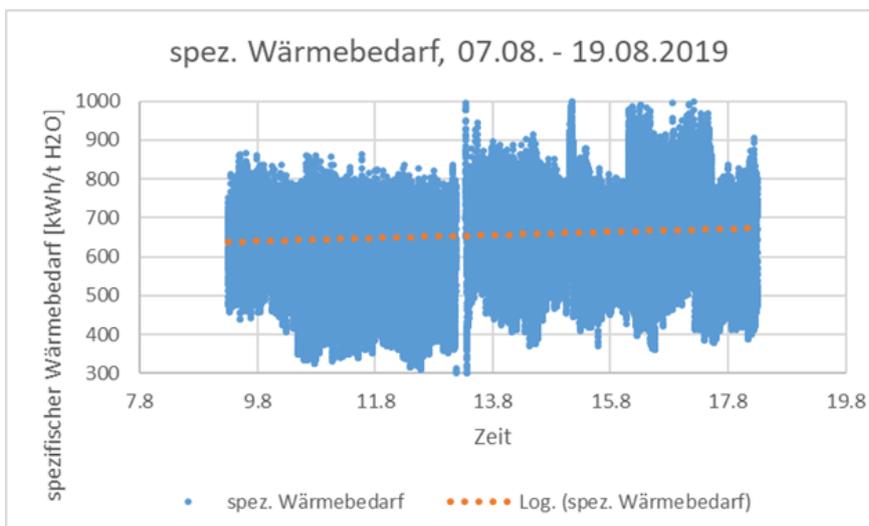


Abb. 22: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm Trockners im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019

Die Abbildungen zeigen, dass dem Trockner in den dargestellten Zeiträumen pro Stunde zwischen ca. 180 und 250 kg entwässerter Schlamm zugeführt wurde. Dieser wies einen TR von ca. 26 % auf. Der entwässerte Schlamm wurde im Trockner von 26 % TR auf mind. 90 % TR getrocknet. Dies bedeutete, dass pro Stunde mind. 128 kg und max. 177 kg Wasser verdampft wurden. Hierzu wurden max. ca. 95 bzw. 130 kW Wärme benötigt. Dies entspricht einem spezifischen Wärmebedarf von max. ca. 740 kWh Wärme für das Verdampfen von 1 t Wasser während der Trocknung.

Der spezifische Wärmeverbrauch von Niedertemperatur-Bandtrocknern, die mit dem EloDry® vergleichbar sind, wurde von den Herstellerfirmen in der Regel mit mindestens 900 - 1.000 kWh/t Wasser_{verdampft} angegeben. Für den EloDry® waren im Rahmen der Ausschreibung von der Herstellerfirma max. 850 kWh/Wasser_{verdampft} gewährleistet worden. Die Tabellen zeigen, dass die auf der KLA Linz-Unkel installierte Trocknung sehr effizient gearbeitet hat, sogar effizienter als erwartet.

Die für die Trocknung benötigte Wärme wurde im Überprüfungszeitraum vorwiegend durch die auf der KLA installierte Mikrogasturbine und den vorhandenen Heizkessel bereitgestellt. Für die Karbonisierungsanlage konnten über den Betrachtungszeitraum (2018 - 2019), aufgrund der Schwierigkeiten einen stabilen Dauerbetrieb aufrecht zu erhalten, keine zuverlässigen Werte für die zur Trocknung bereitgestellte Abwärme ermittelt werden.

2019/20 wurde, neben weiteren Optimierungsmaßnahmen an der Karbonisierungsanlage, die Schneckenpresse ausgetauscht. Darüber hinaus rückte die unbefriedigende Wärmelieferung durch die Mikrogasturbine und das Wärmeversorgungssystem in den Fokus. Anfang 2021 wurde eine größere Schneckenpresse in Betrieb genommen. Sie erlaubte die Entwässerung im geplanten Umfang (112,5 kg TM/h auf 26 % TR im entwässerten Schlamm). Ebenfalls Anfang 2021 wurde der Wärmetauscher der Mikrogasturbine zunächst gereinigt und anschließend ausgetauscht.

Die ab 2021 ermittelten Daten zeigten, dass die Mikrogasturbine nach der Reinigung bzw. dem Umtausch des Wärmetauschers maximal zwar nicht die geplanten 101 kWh/h, aber im Durchschnitt ca. 80 kWh/h und max. ca. 90 kWh/h Abwärme erzeugte (Anhang 3b und 3c).

Sie zeigten darüber hinaus (Anhang 4), dass die Wärme, die die Mikrogasturbine und der Heizkessel 2021 erzeugten (2021/22 im Mittel ca. 150 kWh/h), nur zu knapp 50 % für die Trocknung genutzt wurde. Da der Wärmebedarf der sonstigen Verbraucher der Kläranlage vor Projektstart mit max. 50 kW im Sommer und max. 80 kW im Winter ermittelt wurde, musste davon ausgegangen werden, dass ein Teil der verfügbaren Abwärme, die den sonstigen Verbrauchern zugeleitet wurde (2021/22 im Mittel 84 kWh/h) ungenutzt an die Umwelt abgegeben wurde.

Der extrem - unrealistisch - niedrige spezifische Wärmebedarf, der sich 2021/22 für die Trocknung errechnet (600 bzw. 400 (!) kWh/t Wasser_{verdampft}), zeigt außerdem, dass nicht genügend Wärme für einen stabilen Dauerbetrieb der Trocknung zur Verfügung steht.

In Abbildung 23 sind die Wärmeströme schematisch dargestellt. Die kalkulierten Wärmeströme sind Messwerten aus den Jahren 2021/22 (Anhang 4 – Wärme berechnet aus Messungen von Temperatur und Durchfluss) gegenübergestellt.

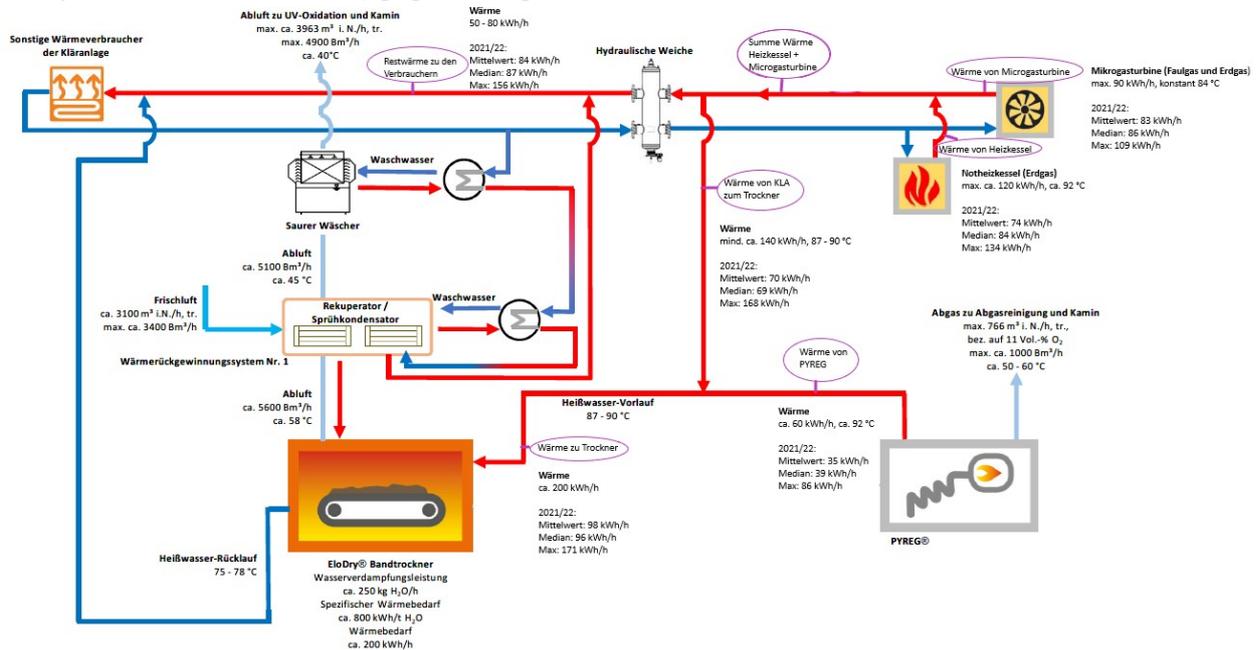


Abb. 23: Schema der Wärmeströme der Klärschlammbehandlung

Die Situation bei der Trocknung ist nachfolgend exemplarisch für den Zeitraum vom 18.07.2022 - 26.08.2022 (Abbildungen 24-26) bzw. 11.08.2022 - 13.08.2022 (Abbildungen 27-29) graphisch dargestellt. Die häufigen Betriebsunterbrechungen sind anhand der Darstellungen für den Zeitraum vom 18.07.2022 - 26.08.2022 (Abbildungen 24-26) gut erkennbar. Sie rührten daher, dass die Zufuhr von entwässertem Schlamm zum Trockner unterbrochen wurde, sobald über trocknerinterne Temperaturmessungen festgestellt wurde, dass der Schlamm während dem Transport durch den Trockner nicht ausreichend getrocknet wurde. Der Trockner ging dann in die „Nachtrocknung“ über – die Schlammzufuhr wurde so lange unterbrochen und das Trocknerband stand so lange still, bis der im Trockner befindliche Klärschlamm den vorgegebenen Trocknungsgrad erreicht hatte.

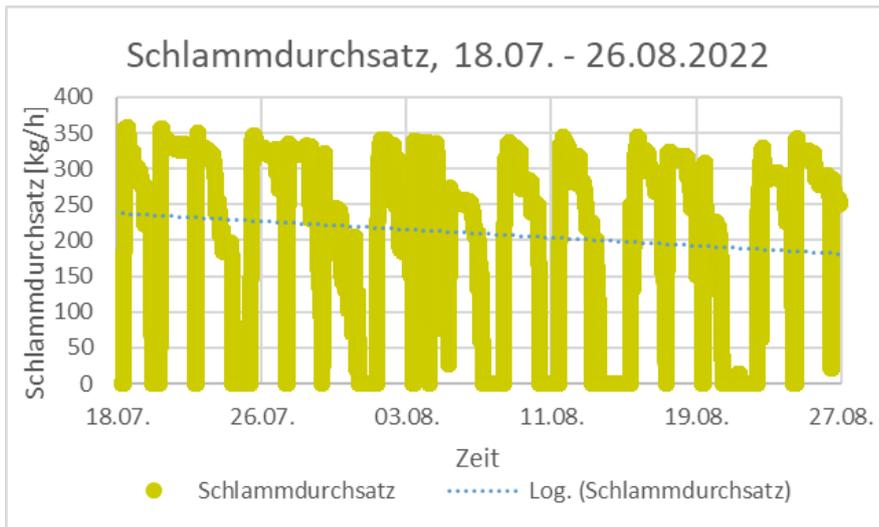


Abb. 24: Schlammdurchsatz durch den Klärschlamm-trockner im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022

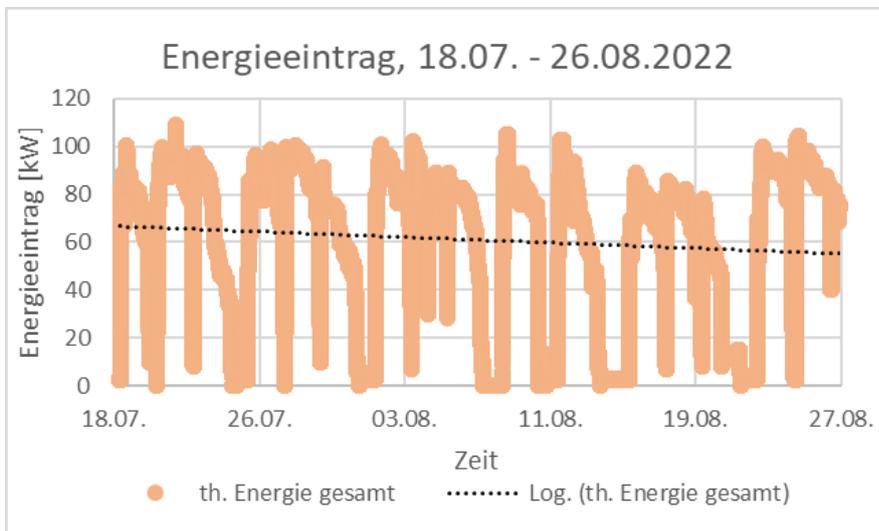


Abb. 25: Wärmeenergieeintrag in die Klärschlamm-trocknung im Zeitraum vom 18.07 - 26.08.2022

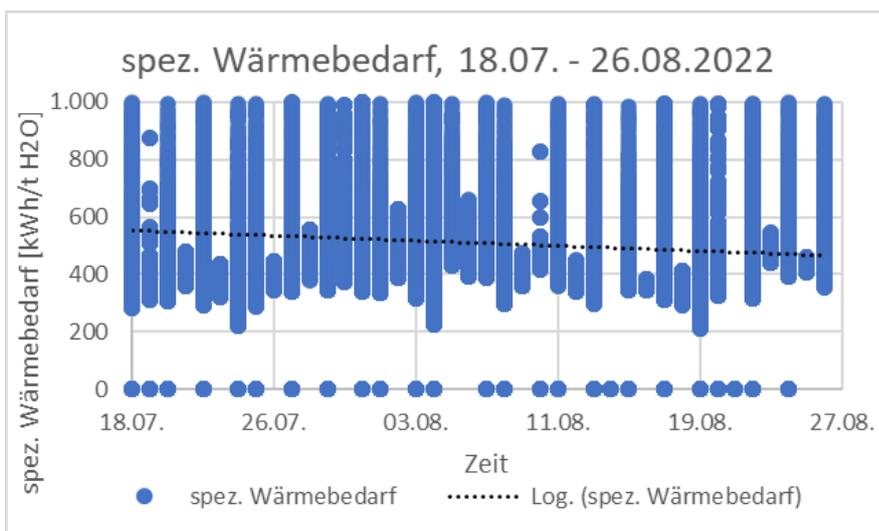


Abb. 26: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm-trockners im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022

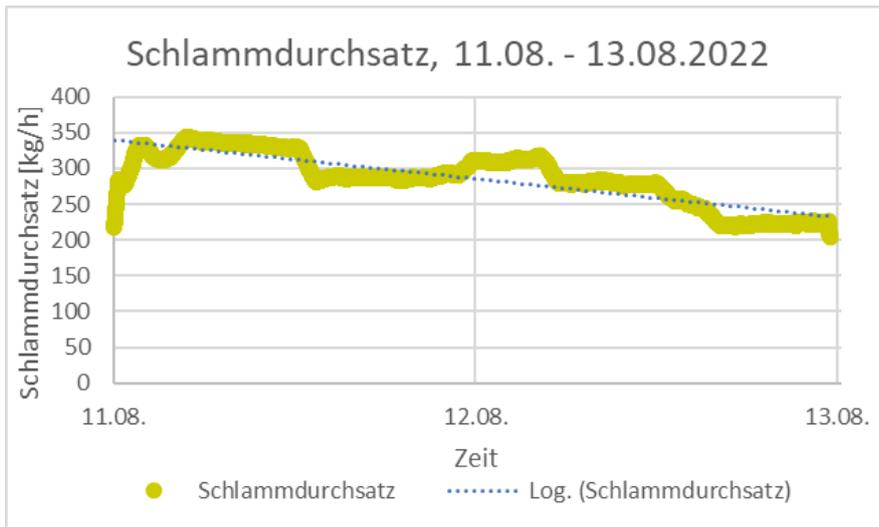


Abb. 27: Schlammumsatz durch die Klärschlamm-trocknung im Zeitraum vom 11.8. - 13.08.2022

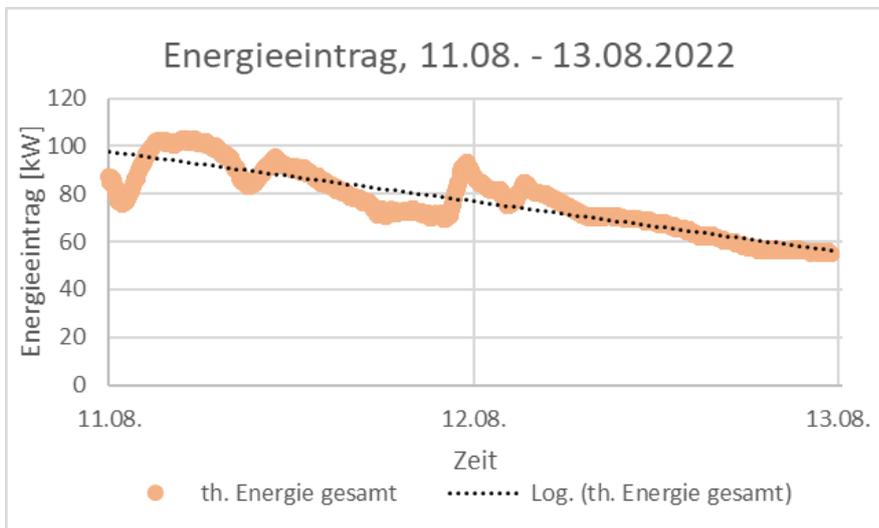


Abb. 28: Wärmeenergieeintrag in den Klärschlamm-trockner im Zeitraum vom 11.08. - 13.08.2022

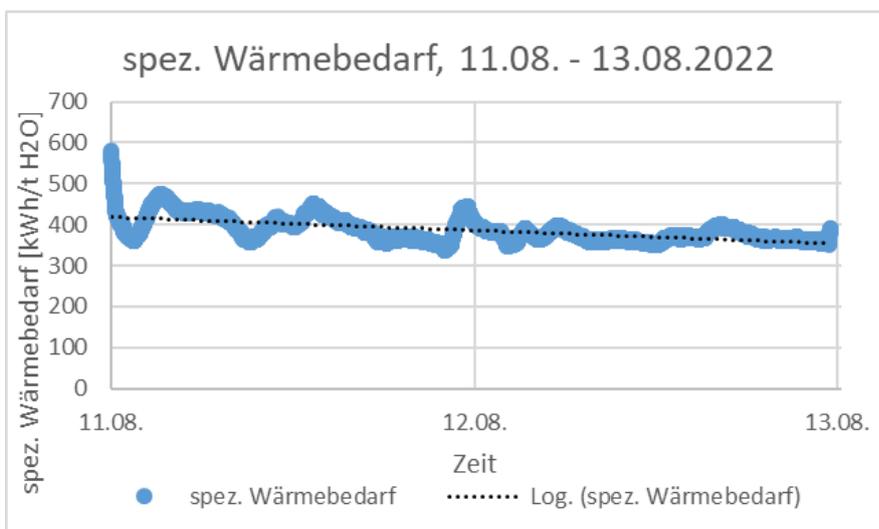


Abb. 29: Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm-trockners im Zeitraum vom 11.08. - 13.08.2022

Diese Feststellungen führten, wie bereits in Kap. 2.3. erläutert, zur Überprüfung des Wärmesystems der Klärschlamm-trocknungs- und -karbonisierungsanlage und zur Planung von Optimierungsmaßnahmen.

Die für die Karbonisierungsanlage seit 2021 erarbeiteten und im Anhang 4 dargestellten Daten wiesen darauf hin, dass bis ca. 0,8 kW Wärme pro kg karbonisierter TM ausgekoppelt werden konnten. Gleichzeitig erhärteten sie die Vermutung, dass die auf der Kläranlage Linz-Unkel installierte Anlage maximal ca. 90 kg TM/h (nicht 112,5 kg TM/h wie geplant) durchsetzen konnte.

Dies bedeutete, dass mit der Anlage im Vollastbetrieb max. ca. 70 kWh/h Abwärme zurückgewonnen werden konnten. Bei Leitungsverlusten von ca. 12 % standen für die Trocknung folglich ca. 60 kWh/h an Abwärme aus der Karbonisierungsanlage zur Verfügung.

Diese Erkenntnisse sind in das im Anhang 7 dargestellte Schema der Stoff- und Wärmeströme der Klärschlamm-entwässerungs-, Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlamm-karbonisierungsanlage der KLA Linz-Unkel, Stand Juni 2023, eingegangen.

Der spezifische Wärmebedarf des Trockners wurde aufgrund der hier beschriebenen Ergebnisse vorläufig mit max. 800 kWh/t Wasser_{verdampft} angenommen.

Beide Daten (Wärmerückgewinnung aus der Karbonisierung in der Karbonisierungsanlage und spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm-trockners) hätten nach Umbau und Anpassung des Wärmesystems nochmals überprüft und verifiziert werden sollen.

2.6.3 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeit der Klärschlamm-behandlungsanlage sollte laut Zuwendungsbescheid insbesondere mit der bisherigen Variante der Klärschlamm-entsorgung verglichen werden. Dabei waren alle Einnahmen, Ausgaben und andere Kosten zu berücksichtigen. Die Häufigkeit sollte 12 Monate betragen.

A. Kosten der Klärschlamm-behandlung vor Umbau, Stand 2014

In den Anhängen 8a und 8b werden die Kosten für die Behandlung des ausgefaulten Klärschlammes der KLA Linz-Unkel ausgewiesen, die 2014 für den Fall angenommen werden mussten, dass das bisherige Verfahren - Entwässerung des Klärschlammes über eine Kammerfilterpresse - beibehalten würde. Berücksichtigt wurde dabei allerdings der (dringend notwendige) Ersatz der bestehenden, überalterten Kammerfilterpresse durch eine neue. Für diese Investition flossen Kosten in Höhe von 400.000 € in die Berechnung ein.

Im Anhang 8a sind die Kosten berechnet für den Fall, dass der entwässerte Klärschlamm wie bisher in der Landwirtschaft hätte verwertet werden können. Im Anhang 8b wird unterstellt, dass der entwässerte Klärschlamm künftig in die Verbrennung hätte gebracht werden müssen.

In den Anhängen 9a, 9b und 9c sind die Kosten für die Klärschlamm-entsorgung der KLA Linz-Unkel ausgewiesen für den Fall, dass der ausgefaulte Klärschlamm ab 2014 nach dem neu geplanten Verfahren (Entwässerung des Schlammes über eine Schneckenpresse, Trocknung im

EloDry®, Karbonisierung des getrockneten Schlammes in der PYREG®-Anlage) behandelt worden wäre.

Im Anhang 9a wurde dabei unterstellt, dass das Karbonisat an die Düngemittelindustrie hätte abgegeben werden können und der Kläranlage dafür keine Kosten entstehen würden, mit dem Karbonisat aber auch keine Erlöse hätten erzielt werden können. Zum Zeitpunkt des Projektstarts 2014 wurde von den Projektpartnern angenommen, dass zumindest dieser Fall realistisch wäre, bestenfalls sogar geringe Erlöse für das Karbonisat hätten erwirtschaftet werden können. Im Anhang 9b und 9c werden zu Vergleichszwecken ergänzend die Kosten ausgewiesen, die 2014 ermittelt wurden, wenn von der Verwertung des Karbonisats in der Landwirtschaft (Anhang 9b) bzw. von der Entsorgung in die Verbrennung (Anhang 9c) ausgegangen worden wäre.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse der Berechnungen der Anhänge 8a/b und 9a/b/c ist in Tabelle 5 wiedergegeben.

Tab. 5: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsprognosen verschiedener Varianten der Behandlung des ausgefaulten Klärschlammes aus Planung 2014

Variante gemäß	Anhang 8a	Anhang 8b	Anhang 9a	Anhang 9b	Anhang 9c
Verfahren:	Entwässerung über Kammerfilterpresse		Entwässerung über Schneckenpresse Trocknung im EloDry® Karbonisierung in der PYREG®-Anlage		
Endprodukt:	Verwertung in der Landwirtschaft	Entsorgung in der Verbrennung	Abgabe an die Düngemittelindustrie	Verwertung in der Landwirtschaft	Entsorgung in der Verbrennung
Kosten/a, €*	304.344 €	432.132 €	372.177 €	397.951 €	425.077 €
Kosten/t TM, €*	540 €	767 €	660 €	706 €	754 €
Kosten/t OS, €*	140 €	199 €	172 €	184 €	196 €

*brutto

Kosten der Klärschlammbehandlung nach Umbau, Stand 2018 und 2021

In den Anhängen 10a und 10b sind Kosten der Klärschlammbehandlung nach dem Umbau wiedergegeben, die für das Jahr 2018 und das Jahr 2021 ermittelt wurden.

2018 wurde ein Teil des Karbonisats an die Sepura GmbH zur Herstellung von Düngemitteln für die Landwirtschaft verwertet, der Rest diente lediglich als Brennstoff-Substitut in einer Mitverbrennungsanlage. Ein Teil des Faulschlammes musste 2018 außerdem, aufgrund der unzureichenden Betriebsstabilität der Karbonisierungsanlage und da die Speicherkapazität der Kläranlage erschöpft war, durch einen Lohnentwässerer entwässert werden. Dieser Anteil an entwässertem Faulschlamm wurde direkt landwirtschaftlich verwertet.

2021 wurde die gesamte auf der KLA Linz-Unkel angefallene Schlammmenge auf der Anlage entwässert, getrocknet und karbonisiert. Das Karbonisat wurde als Brennstoff-Substitut in einer Mitverbrennungsanlage energetisch verwertet.

Tabelle 6 stellt die für 2018 und 2021 ermittelten Klärschlammbehandlungskosten pro Tonne TM den Werten gegenüber, die prognostiziert wurden für den Fall, dass das Karbonisat in der

Landwirtschaft hätte verwertet werden dürfen bzw. in der Verbrennung hätte thermisch verwertet werden müssen (siehe hierzu auch Anhang 9b und 9c). Die 2018 und 2021 ermittelten Kosten lagen deutlich über den in 2014 prognostizierten Kosten. Der genauere Vergleich (Anhang 9b/9c mit Anhang 10a und 10b) zeigt, dass insbesondere die Wartungs- und Instandhaltungskosten, sowie der Gasverbrauch die Erwartungen deutlich übertrafen. Der Vergleich ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tab. 6: Vergleich der Wirtschaftlichkeitsprognosen von 2014 für die neue Klärschlammbehandlungsanlage mit den 2018 und 2021 ermittelten Kosten

Planung aus 2014				IST	
Prognose gemäß	Anhang 9a	Anhang 9b	Anhang 9c	2018	2021
Verfahren:	Entwässerung über Schneckenpresse Trocknung im EloDry® Karbonisierung in der PYREG®-Anlage			Entwässerung über Schneckenpresse Trocknung im EloDry® Karbonisierung in der PYREG®-Anlage	
Endprodukt:	Abgabe an die Düngemittelindustrie	Verwertung in der Landwirtschaft	Entsorgung in der Verbrennung	Entsorgung in der Mitverbrennung und Abgabe zur Düngemittelherstellung (s.o.), außerdem: Verwertung einer kleineren Menge von entwässertem Faulschlamm in der Landwirtschaft	Entsorgung in der Mitverbrennung (andere Anlage als 2018) (s.o.)
Berechnungsbasis: Durchsatz von ... t TM/a	563	563	563	461	433
Kosten/t TM, €, brutto	660,00 €	706,00 €	754,00 €	1.033,00 €	1.295,00 €

2.6.4 Zusammensetzung und Qualität (insbesondere Pflanzenverfügbarkeit, Schwermetallgehalte) des als Klärschlammmasche bezeichneten Verfahrensrückstandes und des entstehenden Düngemittels

Laut Zuwendungsbescheid sollte die Zusammensetzung und Qualität, insbesondere die Pflanzenverfügbarkeit und Schwermetallgehalte der Klärschlammmasche (hier, aufgrund der thermischen Behandlung des Klärschlammes im PYREG®-Reaktor, korrekt: des Klärschlammkarbonisats) beurteilt werden. Dazu gehörten alle relevanten Parameter nach Düngemittelverordnung (DüMV) und Klärschlammverordnung (AbfKlärV), Urangelhalt, der P-Gehalt des Karbonisats, sowie die Ammonicitratlöslichkeit des Phosphors. Die Häufigkeit sollte monatlich sein.

Im Anhang 11 sind die Ergebnisse verschiedener Untersuchungen von 2015 bis 2022 des Karbonisats nach DüMV und AbfKlärV in einer Tabelle zusammengefasst. Bei allen Messungen handelt es sich um Punktmessungen in Form von Stichproben. In allen untersuchten Proben wurden die einzuhaltenden Grenzwerte unterschritten.

Schwermetallgehalte

Der Messwert für Uran im Karbonisat lag bei den vorliegenden Untersuchungen zwischen 3,8 und 6,8 mg/kg TM und damit weit unter dem geforderten Wert der Kommission Bodenschutz am Umweltbundesamt, die für den Uran-Gehalt in Phosphat-Düngern eine Kennzeichnung ab 20 mg Uran je Kilogramm Phosphat (Grenzwert 50 Milligramm Uran je Kilogramm Phosphat) fordert (Umweltbundesamt, 2012). Gleiches galt für den Gehalt an Cadmium, der mit zwischen 0,3 und 1,4 mg/kg TM unterhalb der Grenzwerte der Abfallklärschlammverordnung und der Düngemittelverordnung mit 1,5 mg/kg TM lag. Der Gehalt an Blei lag bei den Messungen zwischen 81 und 143 mg/kg TM (Grenzwert 150 mg/kg TM), der Gehalt an Nickel zwischen 34 und 63 mg/kg TM (Grenzwert 80 mg/kg TM) und der Gehalt an Arsen zwischen 3,3 und 7,4 mg/kg TM (Grenzwert 40 mg/kg TM). Der Gehalt an Kupfer lag zwischen 431 und 572 mg/kg TM und damit unter dem Grenzwert von 900 mg/kg TM, sowie der Gehalt an Zink zwischen 1.870 und 2.650 mg/kg TM unter dem Grenzwert von 4.000 mg/kg TM.

Die Analysen zeigten außerdem, dass nur Spuren von Quecksilber (Hg) mit maximal 0,07 mg/kg TM (Grenzwert 1 mg/kg TM) im Karbonisat enthalten waren. Die Messwerte für Chrom VI und Thallium lagen bei allen Messungen unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze (Grenzwerte: 2 mg/kg TM für Chrom VI, 1 mg/kg TM für Thallium).

Eine Aussage zu An- und Abreicherungen der Schwermetalle im Karbonisierungsprozess konnte aufgrund der Punktmessungen nicht abgeleitet werden.

Organische Schadstoffe

Zwischen 2015 und 2022 wurde das Karbonisat auf verschiedene organische Spurenstoffe untersucht. Unterhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenzen wurden ermittelt perfluorierte Verbindungen (PFC) und polychlorierte Biphenyle (PCB). Der Parameter AOX (adsorbierbare organisch gebundene Halogene) wurde mit 125 bzw. 170 mg/kg TM unterhalb des Grenzwertes von 400 mg/kg TM nachgewiesen.

Für polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), polychlorierte Dibenzo(p)dioxine und -furane (PCDD/F) und dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle (dl-PCB) erfolgten 7 Untersuchungen (3 für PAK) des Karbonisats bei verschiedenen Temperaturen im Reaktor der Karbonisierungsanlage von ca. 500 bis 700 °C. Für die PAK wurde in 2 von 3 Messungen Naphthalin als einziger Parameter nachgewiesen (0,19 mg/kg TM und 0,5 mg/kg TM), wobei keine Abhängigkeit von der Temperatur nachgewiesen werden konnte. Für die dl-PCB war keine signifikante Auswirkung der Reaktortemperatur auf die Bildung der dl-PCB erkennbar. Lediglich in einem Fall wurde bei ca. 500 °C PCB 77 mit 27 ng/kg TM nachgewiesen. PCDD/F konnten in nur einer Untersuchung vom 11.09.2019 nachgewiesen werden. Bei einer Reaktortemperatur von 618 / 611 °C (Reaktor 1, Reaktor 2) wurden 7 von 17 Substanzen mit Messwert oberhalb der jeweiligen Bestimmungsgrenze nachgewiesen mit Toxizitätsequivalent (TE-WHO PCDD/F, 2005) von 1,2 ng TE/kg TM. Bei einer Reaktortemperatur von 625 / 655 °C konnten keine PCDD/F nachgewiesen werden, weswegen ein Zusammenhang der Messergebnisse mit der Temperatur unwahrscheinlich erscheint.

Phosphor-Gehalt und Pflanzenverfügbarkeit

Im Rahmen der Untersuchungen des Karbonisats zwischen 2015 und 2022 auf Parameter der AbfklärV, sowie DüMV wurde der Gehalt an Phosphor zwischen 10,4 und 15 % P₂O₅ gemessen.

Der Nachweis der Pflanzenverfügbarkeit des im Karbonisat der KLA Linz-Unkel enthaltenen Phosphors erfolgte im Rahmen der Bachelorarbeit von Lukas Wald an der Technischen Hochschule in Bingen (Wald, L., 2016/2018). Das Vorgehen und die wesentlichen Ergebnisse sind nachfolgend beschrieben:

Mit der Karbonisierungsanlage der Kläranlage Linz-Unkel wurde Klärschlamm bei 500 °C, bei 600 °C und bei 700 °C karbonisiert (Bezeichnung der bei unterschiedlichen Temperaturen karbonisierten Varianten: Klärschlammkarbonisat (KSK 500, KSK 600, KSK 700)). Außerdem wurde ein Aliquot des Klärschlammes bei 105 °C getrocknet (Bezeichnung: Klärschlamm (KS) nativ), um die Düngewirkung der KSK mit dem nativen Klärschlamm zu vergleichen. Die Düngewirkung dieser Recyclingdünger wurde in einem Gefäßversuch mit Mais und Weidelgras quantifiziert. Varianten ohne Phosphor (P) - Düngung (Kontrolle) und mit Triplesuperphosphat (TSP) in zwei Abstufungen, einem Drittel der P-Menge (1/3 P = 5 mg P / 100 g Boden) und der vollen P-Menge (P voll = 15 mg P / 100 g Boden) dienen dem Vergleich. In den Varianten mit KSK und KS nativ wurden ebenfalls je 15 mg P / 100 g Boden gedüngt. Die KSK enthielten 12,6 bis 14 % P₂O₅, gemessen als Phosphor (5,5 - 6,1 %) im Königswasseraufschluss. Davon waren im KSK 500 80,7 % und im KSK 600 81,5 % neutral-ammoncitratlöslich, im KSK 700 waren es nur 42,6 % (Analysen: LUFA, Kiel).

Tabelle 7 gibt die chemische Kenngrößen der Phosphordünger wieder.

Tab. 7: Chemische Kenngrößen der Phosphordünger

Parameter	Einheit	Phosphordünger				
		KS nativ (Kontrolle)	KSK 500	KSK 600	KSK 700	TSP
pH	dimensionslos	6,6	7,5	7,8	9,3	2,5
Asche	g/100 g TM	38,0	68,9	78,2	73,1	79,0
TM	g/100 g FM ¹⁾	79,1	95,1	96,5	96,9	98,3
Basizität	g CaO/100 g TM	7,1	13,0	15,8	13,5	4,2
P ₂ O ₅ ⁴⁾	g/100 g TM	6,9	12,6	13,3	14,0	48,5
n-AC-P ²⁾	% an Gesamt-P	n.b. ³⁾	81 %	82 %	43 %	n.b.

1) FM = Frischmasse

2) n-AC-P = neutral-AmmonCitratlöslicher Phosphor (Analyse LUFA Kiel)

3) n.b. = nicht bestimmt

4) gemessen mit ICP-OES

Das Karbonisieren führte zu einer Aufkonzentrierung der im Klärschlamm enthaltenen, nicht flüchtigen Nährstoffe (Phosphor, Alkali- und Erdalkalimetalle) und der Schwermetalle (zum Beispiel Cadmium (Cd)). Die Nährstoff- und Schwermetallgehalte der Phosphordünger können Tabelle 8 entnommen werden.

Tab. 8: Nährstoff- und Schwermetallgehalte der Phosphordünger (inverser Königswasseraufschluss, ICP-OES)

Element	Einheit	Phosphordünger				
		KS nativ	KSK 500	KSK 600	KSK 700	TSP
Al	g/ kg TM	15,6	28,8	29,7	31,7	2,6
Fe	g/ kg TM	48,5	86,2	88,3	92,5	1,1
P	g/ kg TM	30,3	55,1	58,3	61,2	212,0
K	g/ kg TM	2,2	4,31	4,1	4,7	0,5
Mg	g/ kg TM	5,3	9,8	9,9	10,4	3,7
Na	g/ kg TM	2,3	4,1	4,1	4,5	3,9
Ca	g/ kg TM	29,9	55,2	57,5	60,0	168,9
Zn	g/ kg TM	1,32	2,4	2,5	2,6	533
Cu	mg/ kg TM	278	518	542	580	33
Cd	mg/ kg TM	13	22	23	23	24
Cr	mg/ kg TM	72	131	131	133	128

Der für den Gefäßversuch verwendete Boden stammte aus der Krume, dem Mutterboden (von Bodenkundlern verwendete Fachbegriffe hierfür sind auch „humoser Oberboden“ oder „Ap-Horizont“), einer zurzeit nicht landwirtschaftlich genutzten Fläche: pH in CaCl₂ 4,9; CAL-P 0,2 mg P/100 g Boden; Sand 33,8 %; Schluff 52,7 %; Ton 13,5 %; Humus 0,5 %. Je Kick-Brauckmann-Gefäß wurden 9 kg Boden eingewogen.

Fotos der Pflanzversuche finden sich im Anhang 12.

Zum Ansetzen der Gefäße (n = 5 in randomisierter Blockanlage im Gewächshaus aufgestellt) wurden die Dünger in die Bodenportionen der jeweiligen Gefäße eingemischt. Stickstoff (N), Kalium (K), Magnesium (Mg) und Mikronährstoffe wurden in allen Portionen in ausreichender Menge appliziert. Der detaillierte Düngeplan kann der Bachelorarbeit von Lukas Wald (2016/2018) entnommen werden. Nach der Düngung wurden die Böden auf 60 % ihrer maximalen Wasserhaltekapazität (WHC) befeuchtet und bei ca. 20 °C aufbewahrt. Nach 14 Tagen (= Inkubationszeit des Düngers) wurde Mais gesät (5 Pflanzen/Gefäß, später auf 3 Pflanzen/Gefäß pikiert, d.h. die Menge an Pflanzen wurde auf drei gesunde Pflanzen reduziert) und die Gefäße im Gewächshaus der Technischen Hochschule (TH) Bingen platziert. Die Böden in den Gefäßen wurden nach dem Auflaufen der Pflanzen täglich auf ca. 75 % der maximalen WHC des Bodens gegossen. Sechs Wochen nach der Aussaat wurde der Mais an der Bodenoberfläche geschnitten, getrocknet und die Trockenmasse (TM) des Aufwuchses gewogen. Die P-Konzentration in der TM wurde analysiert (Mikrowellendruckaufschluss, ICP-OES).

Um festzustellen, ob die Dünger möglicherweise eine langsam wirkende P-Quelle darstellen, wurden nach der Maisernte in jedes Gefäß je 3 g Deutsches Weidelgras gesät sowie Stickstoff (N) und Kalium (K), je 10 mg/100 g Boden, nachgedüngt. Alle zwei Tage wurden die Böden auf ca. 75 % der maximalen WHC befeuchtet. Sechs Wochen nach der Aussaat wurde der Weidel-

grasaufwuchs das erste Mal 5 cm über der Bodenoberfläche geschnitten. Fünf Wochen später wurde das Weidelgras ein zweites Mal geschnitten. Das Erntegut wurde getrocknet, gewogen und auf den P-Gehalt analysiert.

Aus den Gefäßen wurden vor und nach der Inkubationsperiode sowie nach der Maisernte und nach den Weidelgrasschnitten mit einem Erdbohrer je ca. 25 g Boden entnommen und auf laktatlöslichen Phosphor (CAL-P) untersucht.

In der Kontrollvariante, also ohne P-Düngung, kümmerte der Mais und bildete fast keinen Ertrag (Abbildung 30). Am besten wuchs er, wenn er mit 15 mg/100 g Boden mit TSP (TSP voll) gedüngt wurde. Ein Drittel der P-Menge in dieser wasserlöslichen Form (1/3 TSP) reichte aus, um ähnliche Erträge zu erzielen, wie in der Variante mit dem getrockneten, pulverisierten Klärschlamm (KS nativ). Die bei 500 und bei 600 °C hergestellten Karbonisate wirkten fast so gut wie der native Klärschlamm. Die Düngewirkung des bei 700 °C hergestellten Karbonisats war dagegen signifikant geringer. Die geringe Löslichkeit des Phosphors in Karbonisaten, die bei höheren Temperaturen hergestellt wurden, war schon in früheren Laborversuchen aufgefallen (Appel, T. und Friedrich, K., 2017), konnte hier aber nicht weiter verifiziert werden. Die Phosphoraufnahme des Mais zeigte im Prinzip die gleiche Differenzierung wie die Erträge (Abbildung 31).

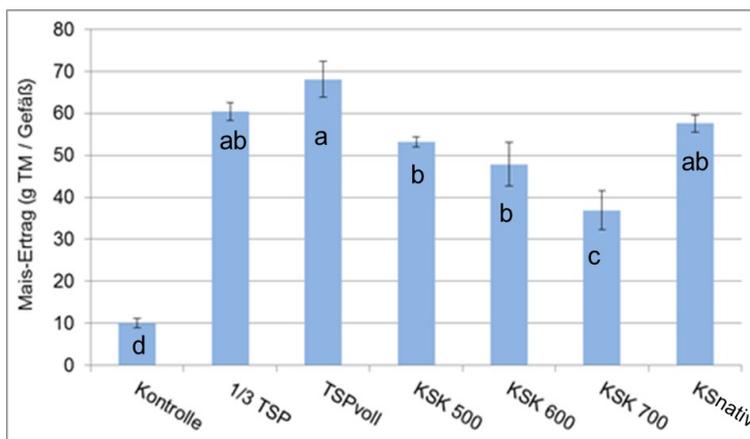


Abb. 30: Ertrag an Mais im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung (± Standardfehler)

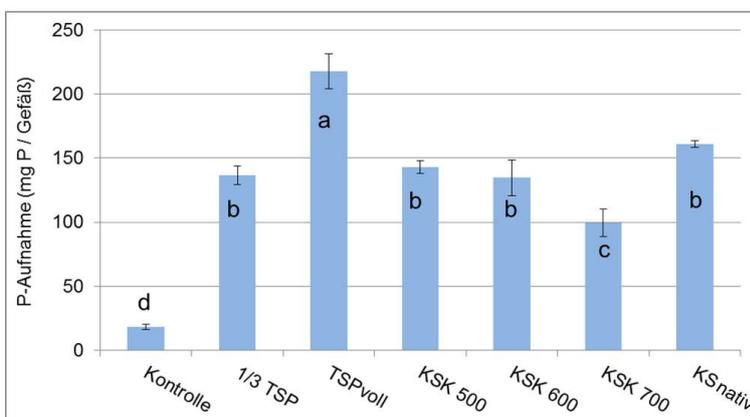


Abb. 31: P-Aufnahme des Maises im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung (± Standardfehler)

In den Versuchen mit dem nachgebauten Weidelgras zeigte sich die Depotwirkung von nativem Klärschlamm und Karbonisaten. Abbildungen 32 und 33 zeigen das Ergebnis beim zweiten Weidelgrasschnitt. Der Klärschlamm und die Karbonisate bewirkten im zweiten Schnitt des Weidelgrases höhere Erträge und eine höhere P-Aufnahme als in der Variante 1/3 TSP. Beim Mais und dem ersten Weidelgrasschnitt waren die Erträge und die P-Aufnahme noch etwa genauso hoch wie in der Variante 1/3 TSP. Die Karbonisate und der Klärschlamm lieferten also, bei einem pH-Wert von 4,4 – 4,8, noch Phosphor an das Weidelgras, als der durch die 1/3 TSP-Düngung den Pflanzen zur Verfügung gestellte Phosphor bereits knapp wurde.

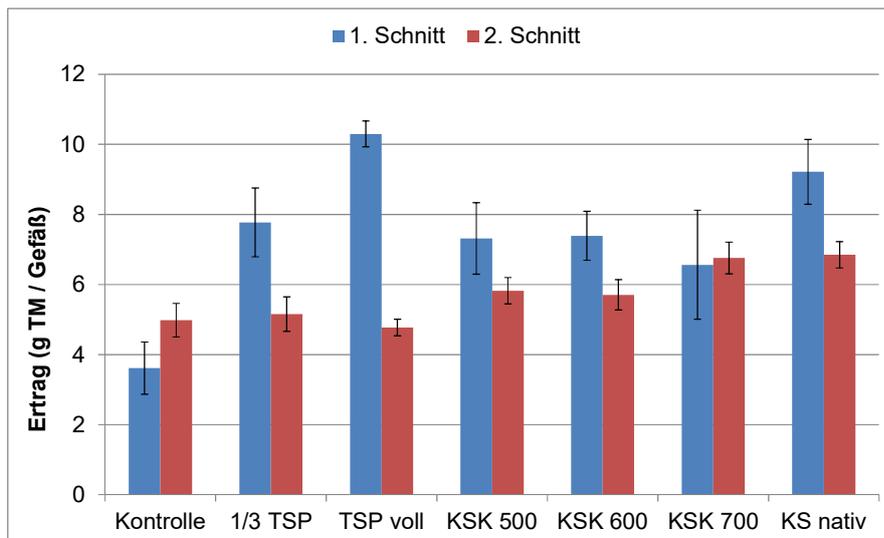


Abb. 32: Ertrag an Weidelgras im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung (± Standardfehler)

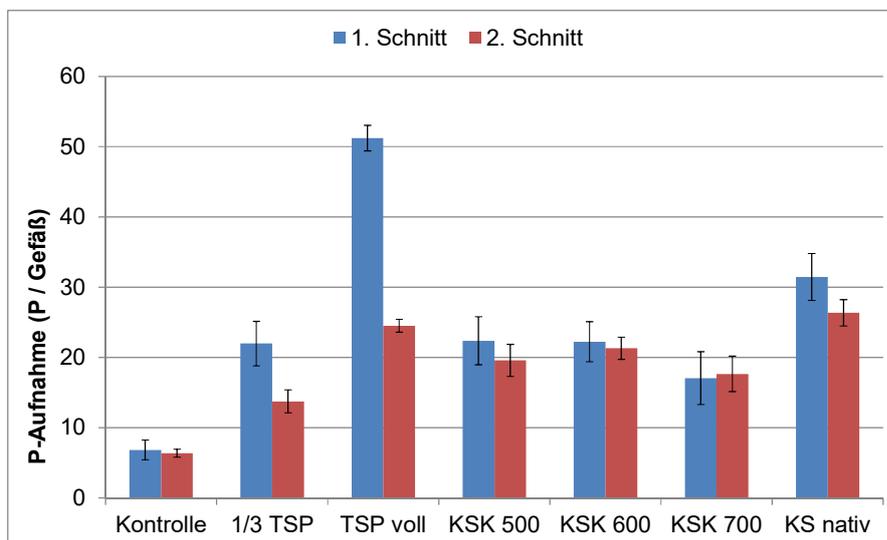


Abb. 33: P-Aufnahme des Weidelgrases im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung (± Standardfehler)

Das P-Nachlieferungspotenzial der Recyclingdünger Karbonisat und nativer Klärschlamm lässt sich auch am laktatlöslichen P im Boden ablesen (Abbildung 34 und 35). Die Gehalte im Boden der mit KSK 500 und KSK 600 gedüngten Varianten waren nach der Maisernte signifikant höher als in der Variante 1/3 TSP. Die höchsten Werte vor und nach dem Mais wies allerdings die voll

gedüngte TSP-Variante auf. Dieser Befund traf selbst noch am Ende des Versuchs nach dem zweiten Weidelgrasschnitt zu und verdeutlicht die Überlegenheit dieses voll wasserlöslichen P-Düngers gegenüber den Karbonisaten. Die Düngung mit dem nativen Klärschlamm hatte hohe Gehalte an CAL-P im Boden zur Folge. Das war deshalb überraschend, weil die P-Düngewirkung des nativen Klärschlammes kaum besser war als die der Karbonisate und sie war signifikant schlechter als die des Triplesuperphosphats (Abbildungen 30-33). Möglicherweise überschätzte die CAL-Methode die Düngewirkung des nativen Klärschlammes. Nahm man die P-Aufnahme der Pflanzen als Maßstab für die Düngewirkung der P-Dünger (Abbildung 31 und 33), dann entsprach die Düngewirkung des KSK 500 für den Mais etwa der Wirkung von 1/3 TSP. Nahm man aber stattdessen den CAL-P im Boden als Maßstab für die Düngewirkung (Abbildung 34 und 35), dann zeigte KSK 500 eine bessere Wirkung als 1/3 TSP, denn CAL-P im Boden war zur Aussaat höher als CAL-P im Boden der 1/3 TSP-Variante. Nach der Ernte des Mais und erst recht nach dem 1. und dem 2. Weidelgrasschnitt war die Disparität noch größer. Der Phosphor aus den Karbonisaten erschien also in relativ größerem Maß als laktatlöslicher P im Boden, als er von den Pflanzen (Mais und Weidelgras) aufgenommen werden konnte.

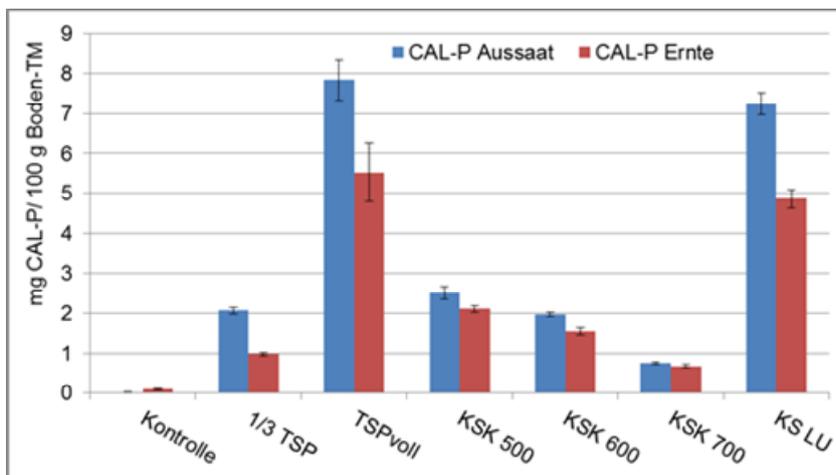


Abb. 34: Laktatlöslicher Phosphor im Boden vor und nach dem Anbau von Mais

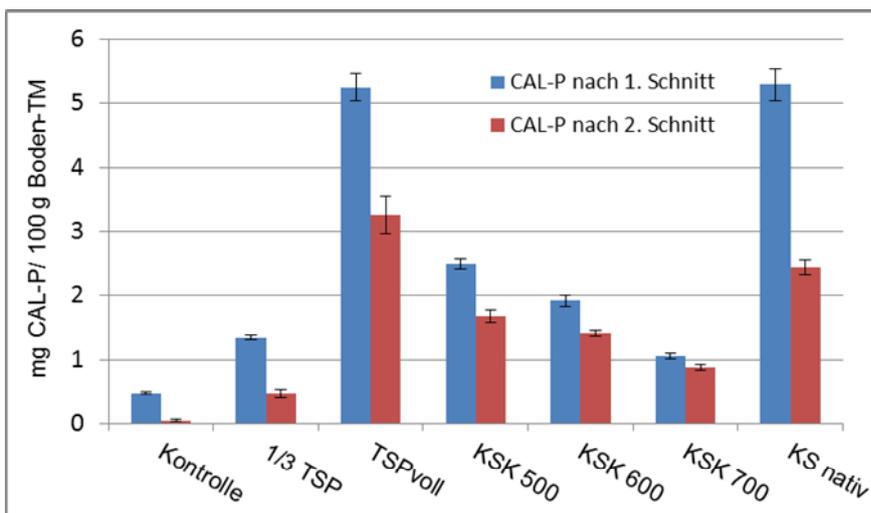


Abb. 35: Laktatlöslicher Phosphor im Boden nach dem ersten und zweiten Schnitt des Weidelgrases

Die beschriebenen Ergebnisse lassen folgendes Fazit zu:

Die bei 500 und 600 °C hergestellten Karbonisate zeigten in den beschriebenen Versuchen eine bessere Düngewirkung als der bei 700 °C karbonisierte Klärschlamm. Die mit der PYREG®-Anlage im industriellen Maßstab bei 500 bzw. 600 °C hergestellten Karbonisate erreichten eine Düngewirkung, die etwa einem Drittel der Wirkung des wasserlöslichen Triplesuperphosphats entsprach.

Die Klärschlammkarbonisate erfüllen damit die wichtigste Voraussetzung für einen Dünger, nämlich düngewirksam zu sein. Das tun sie besser als beispielsweise Klärschlammverbrennungssasche, die ohne chemischen Aufschluss keine oder fast keine kurzfristige Düngewirkung besitzt, weil sie den Phosphor in apathitischer Form enthält. Ökologisch kann das Karbonisieren des Klärschlammes sinnvoll sein, weil auf diese Weise ein bedeutender Teil des Phosphors aus dem Klärschlamm düngewirksam wird und zudem der Klärschlamm regional und in hygienisierter Form als Düngemittel oder Düngemittelzusatz verwertet und der Stoffkreislauf auf diese Weise geschlossen werden kann. Die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm ist jedoch für die Zukunft rechtlich in der AbfKlärV fixiert, so dass die Nutzung des Phosphors aus dem Klärschlamm mittelfristig keinen alleinstellenden ökologischen Verfahrensvorteil des Karbonisierungsverfahrens mehr mit sich bringt. Ökonomisch kann das Karbonisieren und die landwirtschaftliche Verwertung der Karbonisate sinnvoll sein, wenn die Gesamtkosten für die dezentrale Karbonisierung – unter Umständen unter Erzielung von Verkaufserlösen - geringer sind als die, für landwirtschaftliche oder energetische Verwertung.

2.6.5 Nachweis der Asche- und P-Verwertung

Laut Zuwendungsbescheid sollten detaillierte Angaben über die Ascheverwertung (korrekt: der Klärschlammkarbonisatverwertung) und P-Verwertung, d.h. detaillierte Nachweise über den Verbleib des Karbonisats, erbracht werden. Sollte dieses an einen Düngemittelhersteller abgegeben werden, so mussten Nachweise darüber erbracht werden, wie das Karbonisat bei der Düngemittelherstellung verwertet wurde. Insbesondere wurde Wert auf die Beantwortung der folgenden Fragen gelegt:

- Welcher Prozentsatz des Karbonisats findet in welchen Produkten Anwendung?
- Was geschieht mit ggf. nicht verwertetem Karbonisat?
- Wie wird das Karbonisat vorbehandelt?
- Wie und wo wird entstehendes Karbonisat entsorgt?

Die Häufigkeit sollte monatlich bzw. pro Lieferung an den Düngemittelhersteller sein.

Das auf der KLA Linz-Unkel erzeugte Karbonisat wurde über Entsorgungsdienstleister in verschiedenen Mitverbrennungsanlagen als Brennstoff-Substitut energetisch verwertet, mit Ausnahme der Mengen, die vor Ende 2019 erzeugt wurden.

Bis Ende 2019 wurde ein Teil des Karbonisats an einen Düngemittelhersteller abgegeben. Dieser stufte das Material (total ca. 326 t OS), das neben Karbonisat lediglich getrockneten Klärschlamm aus An- und Abfahrprozessen enthielt, zum damaligen Zeitpunkt auf der Basis der AbfKlärV als „Klärschlamm“ ein und nutzte es vollständig für die Weiterverarbeitung zu Klärschlammkomposten (organisch-mineralische Düngemittel); Abfälle aus der Verarbeitung

fielen nicht an. Nach gegenwärtigem Stand des Düngerechts (12/2024) ist die Zumischung von Karbonisaten aus Klärschlamm in Kompost rechtlich nicht zulässig.

Die folgenden Eigenschaften des Karbonisats betrachtete der Düngemittelhersteller dabei als vorteilhaft für die Düngemittelherstellung:

- der im Karbonisat enthaltene pflanzenverfügbare Phosphor.
- der im Karbonisat enthaltene, aus technologiebedingten Gründen, geringe Stickstoffanteil (Untersuchung vom 03.11.2020: 3,4 % TM, Untersuchung vom 04.04.2022: 2,4 % TM), der es erlaubt, aus dem Karbonisat Mischdünger mit kleiner 1,5 % N, bezogen auf die Trockenmasse, zu erzeugen, das heißt Düngemittel ohne wesentliche Stickstoff-Anteile nach Definition der Düngeverordnung. Einschränkungen für Düngemittel mit wesentlichen Anteilen an Stickstoff, wie etwa die Einschränkung in der Stoppeldüngung, werden damit vermieden.
- der Anteil an porösem Kohlenstoff im Karbonisat und die offenporige Struktur, die Feuchtigkeit aufnehmen kann, sowie der Abbau leicht umsetzbarer Organik bei der Karbonisierung, beides Punkte, die, laut Düngemittelhersteller, die Lagerstabilität von Düngemittel-Erzeugnissen erhöhen.
- die Körnung des Karbonisats, die den organisch-mineralischen Dünger besser streufähig macht und damit die Dosiergenauigkeit verbessert.

Die Genehmigungsbehörde (SGD Nord) teilte die Einschätzung des Düngemittelherstellers zur Einstufung von Klärschlammkarbonisat auf Basis der Abfallklärschlammverordnung (AbfKlärV) als „Klärschlamm“ nicht. Mit der Änderungsgenehmigung vom 30.02.2020 (Anhang 5) hat die SGD Nord das auf der KLA Linz-Unkel erzeugte Karbonisat als „Pyrolyseabfall“ (Abfallschlüsselnummer AVV 190118 bzw. 190117) eingestuft und außerdem festgestellt:

„Das entstehende Karbonisat hat in Deutschland derzeit keine düngemittelrechtliche Zulassung und ist daher einer ordnungsgemäßen Entsorgung zuzuführen.“

Nach §3 Abs. 1 DüMV dürfen Düngemittel nur dann in Verkehr gebracht werden, wenn sie einem in der DüMV genannten Düngemitteltyp entsprechen. Festgelegt sind dabei u.a. auch die Ausgangsstoffe, die – je nach Düngemitteltyp – für die Herstellung des Düngemittels eingesetzt werden dürfen. Aus der Verbrennung von Klärschlamm erzeugte Aschen sind laut aktuell geltender DüMV als Ausgangsstoff für die Herstellung von Düngemitteln erlaubt, nicht aber aus Klärschlamm erzeugte Karbonisate.

Aus diesem Grund kann das Karbonisat aus der Klärschlammkarbonisierungsanlage auf Basis der nationalen Düngemittelverordnung, sowie der europäischen Düngeprodukteverordnung derzeit nicht für die Herstellung von Düngemittel eingesetzt werden und ist bis zur Schaffung der rechtlichen Voraussetzung für die Nutzung - bestenfalls der Schaffung eines eigenständigen Düngemitteltyps - „einer ordnungsgemäßen Entsorgung zuzuführen“. Aus diesem Grunde wurde das auf der KLA Linz-Unkel nach 2019 erzeugte Karbonisat lediglich durch Entsorgungsdienstleister als Brennstoff-Substitut entsorgt.

Das düngemittelrechtliche Zulassungsverfahren von aus Karbonisaten erzeugten Düngemitteln wurde von dem Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel 2016 angeregt und fachlich vom Wissenschaftlichen Beirat für Düngungsfragen (WBD) begleitet. Die für die düngemittelrechtliche Zulassung von Düngemitteln aus Karbonisaten erforderliche Empfehlung des WBD ist bis heute (2024) nicht erfolgt. Es bestehen Bedenken bezüglich der Schadstoffbelastung des Karbonisats, insbesondere mit dem Schwermetall Cadmium, sowie wegen der geringeren Pflanzenverfügbarkeit des im Karbonisat enthaltenen Phosphors gegenüber dem als Ausgangsmaterial eingesetzten Klärschlamm. Die Schadstoffbelastung des Karbonisats hängt dabei wesentlich vom Ausgangsmaterial ab; die Düngemittelverordnung legt zudem die Grenzwerte fest, die eingehalten werden müssen. Für die KLA Linz-Unkel konnte gezeigt werden, dass diese Grenzwerte im Karbonisat eingehalten werden konnten. Jedoch ist zu beachten, dass der getrocknete Klärschlamm im Fall der KLA Linz-Unkel vor der Karbonisierung bereits die Grenzwerte eingehalten hat. Es ist nicht davon auszugehen, dass diese Aussage zur Einhaltung der Grenzwerte für Karbonisate von hochbelasteten getrockneten Klärschlämmen allgemeingültig ist, da es im Prozess eher zu An- als zu Abreicherungen von v.a. Schwermetallen kommt.

Im November 2021 wurde der SGD Nord als Genehmigungsbehörde angezeigt, dass das Karbonisat aus der Klärschlammbehandlung der KLA Linz-Unkel künftig als Additiv in verschiedenen Baustoffen (Pigmentersatz in Beton) verwerten werden sollte. Dies würde eine wirtschaftlichere Alternative gegenüber der Entsorgung in der Verbrennung darstellen und sollte daher genutzt werden, bis die rechtlichen Voraussetzungen für die Verwendung von Klärschlammkarbonisat als Düngemittel geschaffen wären. Zu beachten ist hierbei, dass - nach jetzigem Stand - spätestens bei Umsetzung der rechtlichen Vorgaben zur P-Rückgewinnungspflicht (Klärschlammverordnung) diese Verwendung nicht mehr zulässig sein dürfte, da der Phosphor hierbei aus dem natürlichen Kreislauf entnommen wird. Mit Bescheid vom 21.07.2022 teilte die SGD Nord mit, dass es hierfür einer Genehmigung nach § 16 BImSchG bedürfe. Hiergegen wurde seitens des Zweckverbandes Abwasserbeseitigung Linz-Unkel Widerspruch eingelegt, der jedoch in der Folge nicht weiterverfolgt wurde. Die entsprechende Genehmigung wurde schlussendlich nicht mehr beantragt.

3. Ergebnisdarstellung zum Nachweis der Zielerreichung

3.1. Bewertung der Vorhabendurchführung

Die ab 2014 auf der KLA Linz-Unkel installierte Klärschlammkarbonisierungsanlage basierend auf dem PYREG®-Verfahren, war die erste Anlage dieser Art zur kontinuierlichen Karbonisierung von kommunalem Klärschlamm, die in Deutschland errichtet wurde. Sie hatte somit Demonstrations- und Modellcharakter; mit möglichen Schwierigkeiten bei der Umsetzung war zu rechnen.

Technisch wurde das Vorhaben zunächst wie geplant und in Kap. 2.2 detailliert beschrieben realisiert:

- mit einer Schneckenpresse zur Klärschlamm entwässerung
- mit einem EloDry® Niedertemperatur-Bandtrockner zur Klärschlamm trocknung und
- mit einer PYREG® 500 Anlage zur Klärschlamm karbonisierung

Im Projektverlauf wurden Nachbesserungen erforderlich, die detailliert in Kap. 2.3. beschrieben sind. Wesentliche, erfolgreich umgesetzte technische Nachbesserungsmaßnahmen waren vor allem:

- Der Ersatz der ursprünglich installierten Schneckenpresse durch ein leistungsfähigeres, größeres Aggregat (IEA, Typ SP-HF 065 XLG).
Damit konnte die Klärschlamm entwässerung auf der KLA Linz-Unkel mit dem geplanten Durchsatz und dem gewünschten Entwässerungsergebnis betrieben werden.
- Die Nachrüstung einer UV-Anlage als letzte Stufe der Abluftbehandlung der Trockner-abluft.
Damit wurden die im angepassten Genehmigungsbescheid festgelegten Emissionsgrenzwerte für Gesamtkohlenstoff und Geruch der Trocknerabluft sicher eingehalten.
- Die Nachrüstung eines Staubfilters als zusätzliche Stufe zur Abgasbehandlung der Karbonisierungsanlage.
Damit konnten die im Genehmigungsbescheid festgelegten Emissionsgrenzwerte für Staub im Abgas der Karbonisierungsanlage eingehalten werden.

Daneben wurden insbesondere technische Optimierungsmaßnahmen zur Erhöhung des Durchsatzes und der Betriebsstabilität der Karbonisierungsanlage durchgeführt sowie Maßnahmen zur Optimierung der Wärmeversorgung des Trockners.

Der aktuelle Stand stellt sich heute (2024) in der Praxis im Vergleich zur Planung wie folgt dar:

- Die Schlamm entwässerung erfüllt v.a. hinsichtlich des Durchsatzes und der Entwässerungsleistung die Anforderungen der Planung.

- Der Klärschlamm Trockner inklusive Abluftbehandlung erfüllt die Anforderungen der, im Wesentlichen aufgrund der rechtlichen Vorgaben an die Abluftbehandlung, angepassten Planung. Der spezifische Wärmebedarf für die Trocknung ist besser als er bei der Planung zugrunde gelegt wurde, allerdings konnte der exakte Wert aufgrund von Schwierigkeiten bei der Wärmeversorgung nicht genau bestimmt werden.
- Die Karbonisierungsanlage erzielt den bei der Planung zugrunde gelegten Durchsatz nicht und die Wärmerückgewinnung aus der Karbonisierung ist geringer als geplant. Dieses Manko lässt sich durch Nachbessern/Nachrüsten der auf der KLA Linz-Unkel installierten Anlage nicht beheben.
- Die Karbonisierungsanlage der KLA Linz-Unkel kann nicht ausreichend betriebsstabil betrieben werden. Es kommt zu häufigen Anlagenstillständen und häufigen Betriebszeiten mit reduzierter Durchsatzleistung, mit der Folge, dass nicht der gesamte anfallende, getrocknete Klärschlamm sicher karbonisiert werden kann. Die Gründe hierfür (Anlagenleistung vs. Klärschlammqualität) werden von Anlagenbetreiber und der Firma PYREG als Hersteller der Karbonisierungsanlage unterschiedlich bewertet.
- Die Nutzung der Abwärme der Karbonisierungsanlage und von anderen, auf der KLA installierten Aggregaten, insbesondere der Mikrogasturbine, ist mit dem vorhandenen System nicht optimal möglich. Nachbesserungsmaßnahmen, wie ein diskutierter Ersatz der Mikrogasturbine durch zwei 50 KW_{el} BHKW unter Verwendung von Klär- und Erdgas, können – nach Einschätzung eines beratenden Ingenieurbüros - hier Abhilfe schaffen oder zumindest zu einer wesentlichen Verbesserung führen.

Bei der technischen Umsetzung des Vorhabens wurden folgende Schwierigkeiten unterschätzt:

- Die Probleme, die sich an der Karbonisierungsanlage inklusive der Abgasbehandlung im Dauerbetrieb zeigten, waren umfangreicher und zeitaufwendiger als erwartet und sind nach wie vor nicht vollständig behoben, bzw. sind mit der vorhandenen Anlage nicht zu beheben.
- Das neue Klärschlammbehandlungsverfahren der KLA Linz-Unkel ist ein kontinuierlich arbeitendes Verfahren, das in das auf der KLA bereits vorhandene Wärmesystem integriert wurde. Bei der Inbetriebnahme und Optimierung der neuen Klärschlammbehandlungsanlage musste viel Zeit in die Überprüfung und Optimierung des vorhandenen Wärmesystems investiert werden. Trotz aller Maßnahmen konnte die Planung nicht realisiert werden.
- Die Klärschlammkarbonisierung ist ein Verfahren, das dem KLA-Personal unbekannt ist. Der Aufwand für die Ausbildung des Personals wurde unterschätzt.
- Der Aufwand für Reinigung und Wartung, sowohl finanziell als auch zeitlich, wurde deutlich unterschätzt.

Für den Erfolg des Vorhabens war zudem, neben der funktionierenden Anlagentechnik die Verwertbarkeit des Endproduktes, d.h. des Karbonisats, essentiell.

Während der Genehmigungsplanung der Karbonisierungsanlage für die KLA Linz-Unkel im Jahr 2014 wurde die Aussicht auf eine Einstufung des Karbonisats als mineralischer Dünger (Phosphorhaltige Klärschlammverbrennungsasche) positiv eingeschätzt. Diese Einstufung des Karbonisats war jedoch 2015, bei Inbetriebnahme der Anlage, nicht erfolgt.

Parallel hierzu hat das Umweltministerium des Saarlands 2015 eine Einstufung des Karbonisats aus der Karbonisierungsanlage der kommunalen Kläranlage Homburg (Saarland) als Klärschlamm vorgenommen. Das Karbonisat hätte demnach wie unbehandelter Klärschlamm als Dünger verwendet werden können. Diese Einstufung wurde im Saarland nach Intervention der Düngemittelverkehrskontrolle widerrufen.

Eine Einstufung der Karbonisate aus Karbonisierungsanlagen als organisch-mineralisches P-Düngemittel erfolgte am 11.12.2015 im Zuge der Genehmigungsplanung der KLA Emmerich vom Umweltministerium des Landes Nordrhein-Westfalen (NRW). Auch diese Einstufung wurde nach Intervention der Düngemittelverkehrskontrolle widerrufen.

Am 05.08.2016 reichte die Firma Sepura GmbH, ein an der Übernahme des Klärschlammkarbonisates interessiertes Unternehmen, in Zusammenarbeit mit der PYREG GmbH einen offiziellen Antrag zur Zulassung des Klärschlammkarbonisats als P-Düngemittel beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft ein.

Hierzu gab es am 01.12.2016 Rückfragen des Wissenschaftlichen Beirats für Düngefragen (WBD), die mit der Stellungnahme vom 30.01.2017 von den Firmen Sepura GmbH und der PYREG GmbH an den Wissenschaftlichen Beirat beantwortet wurden.

Am 15.02.2017 erfolgte eine Anhörung des Geschäftsführers und des Leiter Produktentwicklung der PYREG GmbH vor dem WBD.

Am 10.03.2017 wurden der PYREG GmbH vom WBD weitere Frage zum Düngemittelantrag gestellt, die von Seiten der PYREG GmbH am 22.12.2017 in einem Schreiben an das Ministerium für Ernährung und Landwirtschaft beantwortet wurden.

Bei einem Besprechungstermin zwischen Vertretern der PYREG GmbH und dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) am 25.04.2018 in Bonn wurde der PYREG GmbH signalisiert, dass man auf die geplanten Änderungen in der EU-Düngemittelprodukteverordnung warte und somit keine zeitnahe Umsetzung des Verfahrens in Aussicht stellen könne, obwohl die Rückfragen des WBD ausreichend aufgeklärt worden seien. Die Verwendung von karbonisiertem Klärschlamm zu Dünge Zwecken wurde in der in 2022 verabschiedeten EU-Düngemittelprodukteverordnung (European Union, EUR-Lex, 2022) letztlich jedoch ausgenommen.

Aus diesem Grunde wurde ein alternativer Weg beschritten um den Einsatz von Karbonisaten aus kommunalem Klärschlamm als Düngemittel rechtssicher zu ermöglichen:

2018 erfolgte die Registrierung als mineralisches Düngemittel in Schweden (Registrierungsbestätigung der schwedischen Chemikalienbehörde KEMI vom 27.09.2018, Anhang 13) auf

Basis damaliger dortiger Rechtslage. Das Material durfte auf Grund dessen in Schweden als Düngemittel gehandelt und angewendet werden.

Im Rahmen des Verfahrens der "gegenseitigen Anerkennung" nach EG-Verordnung Nr. 764/08 vom 09.07.2008 bzw. der EU-Verordnung 2019/515 sollte das Karbonisat nach Einschätzung der PYREG GmbH damit außerdem auch in Deutschland als Düngemittel in Verkehr gebracht werden dürfen. Entsprechend der EU-Verordnung 2019/515 könnte der Hersteller/Inverkehrbringer eine Selbsterklärung verfassen und es bedürfe keiner weiteren Zulassung einer deutschen Behörde, so die PYREG GmbH. Für ein Inverkehrbringen als Düngemittel in Deutschland im Rahmen des Verfahrens der „gegenseitigen Anerkennung“ müssten Karbonisate allerdings zusätzlich zu den in Deutschland gültigen Grenzwerten auch die in Schweden gültigen Grenzwerte einhalten. Dies bedeutet für Klärschlammkarbonisate, dass auch der in Schweden geltende Grenzwert für Cadmium eingehalten werden muss, der mit 20 mg/kg P₂O₅ TM strenger ist als in Deutschland (50 mg/kg P₂O₅ TM). Messwerte des Klärschlammkarbonisats der KA Linz-Unkel liegen bei max. ca. 11 mg/kg P₂O₅ TM (vgl. Analysen aus Anhang 11).

Dennoch stellt die SGD-Nord, Koblenz im Änderungsbescheid vom 30.03.2020 (Anhang 5) fest (Zitat): „Das entstehende Karbonisat hat in Deutschland derzeit keine düngemittelrechtliche Zulassung und ist daher einer ordnungsgemäßen Entsorgung zuzuführen.“ Eine hiergegen durch den Abwasserzweckverband Linz-Unkel am 27.11.2020 eingereichte Klage beim Verwaltungsgericht Koblenz hatte ebenso wenig Erfolg (vgl. Az.: 4 K 1093/20.KO vom 25.11.2021), wie auch die Klage auf Zulassung der Berufung hiergegen beim Oberverwaltungsgericht Rheinland-Pfalz Koblenz (vgl. 1 A 10068/22.OVG).

Auch die Stellungnahme des WBD vom 15.07.2022 besagt (Zitat): „Insgesamt bleibt der Wissenschaftliche Beirat für Düngemittelfragen bei seiner schon im Schreiben vom 25. November 2020 erläuterten Empfehlung, dass Klärschlammkarbonisate aufgrund ihrer im Vergleich zu anderen P-Recyclingdüngern unbefriedigenden Düngewirkung nicht in die DüMV aufgenommen werden sollten.“

Im Ergebnis waren damit alle Versuche des Zweckverbandes Abwasserbeseitigung Linz-Unkel und der PYREG GmbH, Klärschlammkarbonisate rechtssicher als Düngemittel in Deutschland zu etablieren, erfolglos. Eine Prognose, ob bzw. wann diese Zulassung künftig erreicht werden kann, ist nicht möglich.

Dies hat das Vorhaben stark negativ beeinflusst bzw. letztlich vollständig in Frage gestellt, da die Vorhabenziele ohne die Möglichkeit der Verwertung des erzeugten Karbonisats als Düngemittel nicht erreicht werden konnten. Aus diesem Grund wurden an der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel ab 2021/22 weitere projektbezogene Optimierungsmaßnahmen zunehmend zögerlicher bzw. ab 2022/23 nicht mehr in Angriff genommen.

3.2. Stoff- und Energiebilanz

Im Anhang 1 sind die geplanten Stoff- und Wärmeenergieströme der neuen Klärschlammbehandlungsanlage dargestellt. Anhang 7 gibt die Stoff- und Wärmeenergieströme wieder wie sie sich, bei stabilem Betrieb der Karbonisierungsanlage, auf der KLA Linz-Unkel bestenfalls realisieren lassen.

Wie in Kap. 2.3.1, Anlagendurchsatz, beschrieben, kann die Karbonisierungsanlage nicht mit den geplanten 112,7 kg TM/h, sondern mit maximal ca. 90 kg TM/h betrieben werden. Dies ist in Anhang 7 dargestellt. Allerdings ist ein stabiler Volllastbetrieb der Karbonisierungsanlage mit 90 kg TM/h bzw. mit 97,8 kg/h Schlamm mit 92 % TR über 4 - 5 Betriebstage bislang nicht möglich, meist gelingt dies nur nach der wöchentlichen Anlagenwartung für ca. 2 Tage, danach geht die Leistung der Anlage kontinuierlich zurück.

In Kap. 2.3.2, Wärmeversorgung, wird erläutert, dass das Wärmenetz der KLA Schwachstellen aufweist und verbessert werden muss, damit die auf der Anlage verfügbare Wärme optimal genutzt und eine belastbare Wärmebilanzierung durchgeführt werden kann. Anhang 7 gibt auch die Wärmemengen und -ströme wieder, wie sie sich derzeit, bei stabilem Volllastbetrieb der Karbonisierungsanlage (Durchsatz: 90 kg TM/h) ergeben. Die größte Unsicherheit besteht hierbei bezüglich des im Anhang dargestellten Wärmebedarfs des Niedertemperaturtrockners. Sie ist im Anhang 7 mit ca. 800 kWh/t Wasser_{verdampft} angegeben, scheint aber (siehe Tabelle im Anhang 4) eher geringer zu sein.

In Tabelle 9 sind die wichtigsten Anlagenkenngrößen laut Planung den bislang tatsächlich erreichten Werten gegenübergestellt.

Tab. 9: Vergleich der wichtigsten Anlagenkenngrößen (Soll lt. Planung / Ist 2023)

		Soll lt. Planung	Ist Juni 2023
Entwässerung			
Input	Faulschlamm, m ³ /h	3,22	√
	Faulschlamm, kg TM/h	112,7	√
Output	Faulschlamm entwässert, % TR	mind. 26	√
Niedertemperatur-Bandrockner EloDry®			
Input	Faulschlamm entwässert, kg/h	433,3	√
	Faulschlamm entwässert, % TR	mind. 26	√
Output	Faulschlamm getrocknet, % TR	mind. 85	√
	Wasserverdampfungsleistung	kg H ₂ O/h	ca. 300
Spezifischer Wärmebedarf	kWh/t H ₂ O	max. 840	max. 800
Bh/a		> 7500	√
Karbonisierungsanlage PYREG®			
Input	Faulschlamm getrocknet, kg/h	132,5	ca. 100
	Faulschlamm, kg TM/h	112,7	max. 90
	Faulschlamm getrocknet, % TS	mind. 85	mind. 90
Output	Karbonisat, kg/h	92	max. 74
	Wärme, kWh/h	ca. 160	ca. 60
Mikrogasturbine			
Output	Wärme, kWh/h	101	max. 90

3.3. Umweltbilanz

Die Masse des getrockneten Klärschlammes wird beim Durchgang durch die Karbonisierungsanlage auf ca. 50 - 60 % reduziert (ca. 100 kg getrockneter Schlamm mit ca. 90 % TR ergibt ca. 55 kg Karbonisat, trocken). Der Massenverlust erfolgt durch das pyrolytische Umsetzen der organischen Inhaltsstoffe sowie das Verdampfen von Restwasser im getrockneten Schlamm sowie von anorganischen Komponenten, deren Siedekurven bzw. Dampfdrücke erreicht werden. Abbildung 36 gibt das Ergebnis von vergleichenden Untersuchungen von Inhaltsstoffen im getrockneten Klärschlamm und im trockenen Klärschlammkarbonisat wieder, die von der PYREG GmbH durchgeführt wurden.

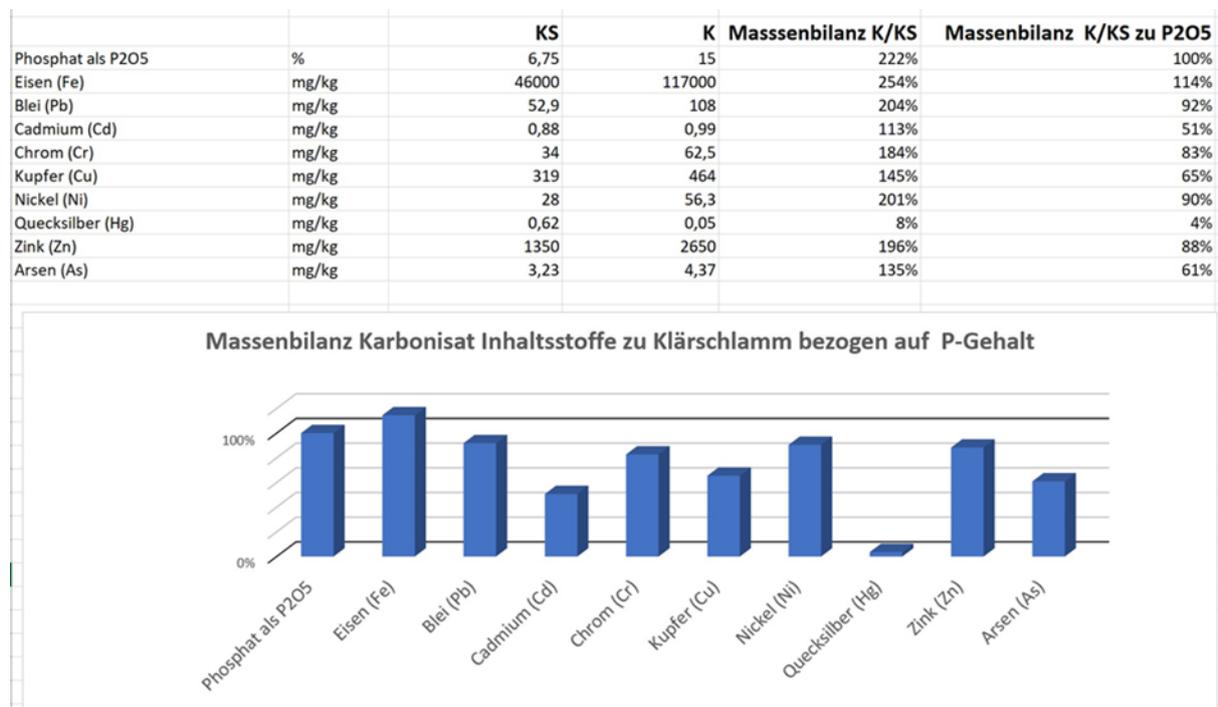


Abb. 36: Massenbilanz und Vergleich der Inhaltsstoffe von Klärschlamm (KS) und Klärschlammkarbonisat (K) und Bezug auf den Phosphat-Gehalt

Quelle: Daten vom 19.10.2018, PYREG GmbH

Die Daten zeigen, dass sich die untersuchten Schwermetalle im Karbonisat größtenteils, aufgrund der Massenreduktion um ca. 50 - 60 % während der Karbonisierung, auf etwa das Doppelte anreichern. Hingegen wird Quecksilber zu über 95 % reduziert. Cadmium und Arsen bleiben mit leicht erhöhtem Absolutgehalt nahezu konstant, was aufgrund der Massenreduktion im Karbonisierungsprozess bedeutet, dass diese Stoffe in ähnlichem Maß abgereichert werden, wie der Kohlenstoff selbst. Bezogen auf den düngerelevanten Phosphoranteil von Klärschlamm bzw. Karbonisat erfolgt durch die Karbonisierung folglich eine Abreicherung des Klärschlamm bezogen auf diese drei Schwermetalle.

Auf der KLA Linz-Unkel lagen alle untersuchten Karbonisatproben trotz der Aufkonzentrierung von etlichen Schwermetallen im Karbonisat unter den von der Düngemittelverordnung vorgegebenen Grenzwerten (siehe Tabelle Anhang 11). Zu beachten ist hierbei, dass der Klär-

schlamm der KLA Linz-Unkel als Ausgangsstoffe der Karbonisierung keine nennenswerten Gehalte an Schwermetallen enthält.

Die pyrogene CO₂-Abscheidung und -Speicherung (engl. *pyrogenic carbon capture and storage*, daher abgekürzt PyCCS) ist ein Verfahren, bei dem durch Pyrolyse organischer Stoffe (z. B. pflanzliche Abfälle, Bioabfall) CO₂ als „Pyrokohle“ abgeschieden bzw. gespeichert wird. Klärschlamm wäre hierzu als organisches Material grundsätzlich geeignet. PyCCS verschiedener organischer Materialien wird das Potenzial zur Kompensierung überschüssigen Kohlenstoffdioxids aus der Atmosphäre der Erde zugeschrieben und wurde im Rahmen der Klimakrise daher verschiedentlich als vielversprechendes Verfahren vorgeschlagen, das zur Einhaltung des 1,5-Grad-Ziels aus dem Pariser Übereinkommen von 2015 beitragen könnte. Der Sachverständige Dr. Thome vom Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP hat in einer Stellungnahme für den deutschen Bundestag am 03.07.2023 das Potenzial von PyCCS für verschiedene organische Materialien (nicht nur auf Klärschlamm bezogen) mit 20 – 40 % Abscheidung des Gesamtkohlenstoffs als „Pyrokohle“ ermittelt. Die durch pyrolytische Prozesse eingelagerte Kohle wird auch „Biokohle“ (engl: „Biochar“) genannt.

Bei der Karbonisierung von Klärschlamm werden im Gegensatz zur Verbrennung von Klärschlamm erhebliche Mengen Kohlenstoff in das Karbonisat eingelagert und könnten so für Jahrtausende dem Kreislauf entzogen werden (Quelle z.B. Kuzyakov, Y., Bogomolova, I., Glaser, B., 2014).

Aus den Daten der aus dem Klärschlamm der KLA Linz-Unkel hergestellten Karbonisatmengen wurden die über das Karbonisat direkt sequestrierten CO₂-Äquivalente der Jahre 2016 – 2019 ermittelt (Tabelle 10). Es ist nur die Sequestrierungsleistung des im Karbonisat enthaltenen Kohlenstoffs gerechnet, sofern dieser wieder in den Boden kommt. Die Berechnung berücksichtigt keinen Verbrauch an Strom und Gas, sowie keine Transportemissionen und ähnliches.

Tab. 10: Vermiedene CO₂-Emissionen durch Einlagerung von elementarem Kohlenstoff in das Klärschlamm-Karbonisat der KLA Linz-Unkel bei Verbringung in den Boden in der Projektphase

Jahr	Menge Karbonisat [t/a]	Kohlenstoffgehalt Karbonisat, Mittel	Sequestrierung, CO ₂ -Äquivalent* [t/a]
2016	87	20 %	63,8
2017	178	20 %	130,5
2018	207	20 %	151,8
2019 (bis 01.10.)	194	20 %	142,3
* Berechnet aus der Molmassenbilanz: C = 12, CO ₂ = 12x2x16 = 44/12 = 3,667			Summe: 488,4 t

Ökologisch kann der bei der dezentralen Klärschlammbehandlung reduzierte LKW-Verkehr und die damit verbundene Reduktion klimaschädlicher Emissionen zu Buche schlagen. Tabelle 11 verdeutlicht die maximal mögliche Reduktion der LKW-Transporte bei Einsatz des Karbonisierungsverfahrens zur Klärschlammbehandlung für den Standort der Kläranlage Linz-Unkel.

Dabei wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Der entwässerte Schlamm würde der Verbrennung in einer Mitverbrennungsanlage in Bottrop zugeführt, wie dies für Schlamm der KLA Linz-Unkel seit Mitte 2020 der Fall war.
- Die geplante Jahresmenge an Klärschlamm-Trockenmasse (563,4 t/a, siehe Kap. 2.2.) würde vollständig karbonisiert.
- Das Karbonisat könnte in einem Umkreis von 50 km an Verbraucher (Landwirte) abgegeben werden.

Tab. 11: LKW-Transporte bei Schlammfäulung und Entwässerung bzw. Schlammfäulung mit nachfolgender Entwässerung, Trocknung und Karbonisierung auf der KLA Linz-Unkel

Kenndaten	Einheit	entwässerter Schlamm	mit EloDry® + PYREG®
Kapazität LKW	T	25	25
Zu entsorgende Menge Klärschlamm (TR: 26 %)	t/a	2.167	460
LKW-Transporte pro Jahr		87	19
Transport-Entfernung (Annahme)	Km	130	50
Spezifische CO ₂ -Emissionen LKW-Transport*	kg _{CO2} /t _{Schlamm} /km	0,103	0,103
CO ₂ -Emissionen	kg _{CO2} /a	29.016	2.369
Vermiedene CO ₂ -Emissionen	kg/a	26.647	
*Quelle: https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehrlaerm/emissionsdaten#verkehrsmittelvergleich_personenverkehr			

3.4. Wirtschaftlichkeitsanalyse

Eine direkte landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes wurde aufgrund der Änderung der gesetzlichen Grundlagen u.a. der AbfKlärV in 2017 erschwert bzw. wird zukünftig nahezu unmöglich. Die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm ist ab dem Jahr 2029 nur noch für Abwasserbehandlungsanlagen mit einer Ausbaugröße von bis zu 100.000 EW, bzw. ab dem Jahr 2032 nur noch für Klärschlämme aus Anlagen mit bis zu 50.000 EW möglich. Entsprechend der bisherigen Entwicklungen der Gesetzgebung neue Techniken über große Anlagengrößen auf immer kleinere zu übertragen, ist mittelfristig davon auszugehen, dass auch der Klärschlamm der KLA Linz-Unkel mit ca. 30.000 EW zukünftig nicht mehr landwirtschaftlich verwertet werden darf. Zur Reduktion der bodenbezogenen Verwertung trägt auch die mangelnde Flächenverfügbarkeit für eine Klärschlammaufbringung und eine Verkürzung der Aufbringungszeiten bei.

Aus diesen Gründen kommt nach derzeitigem (2024) Kenntnisstand auch für kleinere Kläranlagen wie die KLA Linz-Unkel mittel- bis langfristig nur die Entsorgung des Klärschlammes in der Verbrennung in Frage, wobei der Phosphor zurückgewonnen werden muss. Verschiedene Verfahren hierzu befinden sich derzeit noch überwiegend im Forschungsprojektstadium.

Bei Projektstart 2014 mussten 115,00 €/t Klärschlamm mit 25 - 27 % TR für die Entsorgung des Klärschlammes über einen Entsorgungsdienstleister aufgewandt werden. 2018 betragen diese Kosten 102,09 €/t, 2021 89,25 €/t und heute - Stand Anfang 2024 - müssen hierfür rd. 136 €/t entwässertem Klärschlamm bezahlt werden.

Die tatsächlich in 2018 und 2021 für die Behandlung des Klärschlammes mit der neuen Anlagentechnik (Entwässerung über die Schneckenpresse, Trocknung im EloDry® Niedertemperaturbandtrockner, Karbonisierung in der PYREG®-Anlage) ermittelten Kosten wurden in Kap. 2.6.3. bereits den prognostizierten Werten gegenübergestellt.

Insbesondere lagen die Kosten für die Wartung und Instandhaltung, sowie für den Gasverbrauch während der Projektlaufzeit deutlich über den prognostizierten Werten. Die hohen Wartungs- und Instandhaltungskosten wurden vorrangig durch die Karbonisierungsanlage verursacht. Hier flossen auch die Kosten für die regelmäßig wiederkehrenden, von behördlicher Seite geforderten, Emissionsmessungen ein, die mit ca. 30.000 €/a zu Buche schlugen. Daneben wurde der Aufwand für die Instandhaltung der Förderschnecken des Klärschlamm-trockengutes und des Karbonisats unterschätzt, die aufgrund der Abrasivität des Materials einem erhöhten Verschleiß unterlagen. Allerdings wurden im Verlauf des Projektes anlagentechnische Modifikationen durchgeführt (insbesondere: Anpassung der Wendelstärke, Wechsel des Materials), die zur Annahme berechtigten, dass sich die Lebensdauer der Schnecken dadurch erhöht.

In Anhang 14a sind die, bereits im Anhang 10a dargestellten, tatsächlichen Kosten für die Klärschlamm-entsorgung 2021 ohne Berücksichtigung des Kapitaldienstes berechnet. In Anhang 14b wurde dieselbe Berechnung unter der Annahme durchgeführt, dass der Klärschlamm direkt nach der Entwässerung über einen Entsorgungsdienstleister entsorgt würde.

Das direkte Verwerten des entwässerten Klärschlammes durch einen Entsorgungsdienstleister v.a. zur energetischen Verwertung wäre für die KLA unter diesen Voraussetzungen wesentlich wirtschaftlicher gewesen, als die zusätzliche vorherige Trocknung und Karbonisierung. Erst bei einem Entsorgungspreis von 195 € pro t Klärschlamm wären bei beiden Vorgehen (Entsorgung von entwässertem Klärschlamm vs. Entsorgung von getrocknetem und karbonisiertem Klärschlamm) Kosten in vergleichbarer Höhe (ca. 245 €/t entwässertem Klärschlamm bzw. ca. 946 €/t TM) angefallen.

Die Wirtschaftlichkeit der Anlage könnte durch folgende Maßnahmen weiter verbessert werden:

- die Optimierung des Wärmenetzes,
- die Verbesserung der Betriebsstabilität der Karbonisierungsanlage,
- und die Möglichkeit der Verwertung des Karbonisats als Düngemittel.

Unter den Voraussetzungen der Vorgaben im Anhang 14 wären die Kosten bei beiden Vorgehen (Entsorgung von entwässertem Klärschlamm vs. Entsorgung von getrocknetem und karbonisiertem Klärschlamm) für einen Entsorgungspreis von ca. 120 €/t für entwässerten Klärschlamm als Originalsubstanz vergleichbar, wenn die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammkarbonisierungs-Anlage auf ca. 2/3 reduziert würden und das Karbonisat kostenlos z.B. an die Düngemittelindustrie abgegeben werden könnte.

Aufgrund des Kohleausstiegs in Deutschland werden zukünftig Kapazitäten zur Mitverbrennung von Klärschlamm in Kohlekraftwerken sinken, bzw. nicht mehr existieren. Ebenso wird sich aufgrund der Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, sofern das Recycling direkt aus der Klärschlammverbrennungssasche erfolgt, eine Mitverbrennung aufgrund der Fremdstoffasche, welche den Phosphorgehalt in der Gesamtasche reduziert, die Orientierung am Markt mehr auf reine Klärschlammverbrennungsanlagen konzentrieren. In Anbetracht dieser Verknappung von Verbrennungsressourcen ist eine – zumindest lokale – Preissteigerung für die zukünftige energetische Klärschlammverwertung zu erwarten. Hierdurch könnten derzeit unwirtschaftliche Alternativverfahren zukünftig interessant werden.

3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Beim Verfahren der Klärschlammkarbonisierung wird entwässerter und getrockneter Klärschlamm thermisch behandelt, wobei im Vergleich zur Klärschlammverbrennung der Klärschlamm nicht vollständig mineralisiert wird. Entgegen der Mineralisierung verbleiben bei der Karbonisierung höhere Kohlenstoffgehalte bis ca. 20-40 % Restkohlenstoff im Produkt. Die wesentlichen Merkmale beider Verfahren sind in Tabelle 12 vergleichend gegenübergestellt.

Tab. 12: Gegenüberstellung wesentlicher Merkmale von KS-Karbonisierung und KS-Verbrennung

	KS-Karbonisierung	KS-Verbrennung
Anlagengrößen	bis max. ca. 2.300 t getrockneter KS/a	ab ca. 500 t/h teilgetrocknetem KS, meist >> 18.250 t/a
Genehmigungsrechtliche Anforderungen		
Genehmigung	Genehmigung nach 4. BImSchV, vereinfachtes Verfahren gemäß § 19 BImSchG ,d.h. ohne Öffentlichkeitsbeteiligung	Genehmigung nach 4. BImSchV, nur in Ausnahmefällen (Anlagen mit max. 18.250 t/a an zu trocknendem bzw. 3 t/h an zu verbrennendem KS) nach vereinfachtem Verfahren gemäß § 19 BImSchG, d.h. ohne Öffentlichkeitsbeteiligung
Emissionsgrenzwerte	Vorgaben für Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV müssen eingehalten werden	Vorgaben für Emissionsgrenzwerte der 17. BImSchV müssen eingehalten werden
Verfahrenstechnische Anforderungen und Besonderheiten		
Anforderungen an das Inputmaterial	Klärschlamm mit mind. 85 % TS	Klärschlamm mit mind. 40 - 45 % TS, d.h. soweit getrockneter KS ("teilgetrockneter KS"), dass eine autotherme Verbrennung möglich ist

Reaktionstemperatur	ca. 550 – 700 °C	Lt. 17. BImSchV ist eine erforderliche Mindesttemperatur von 850 °C nach der letzten Verbrennungsluft-Zufuhr einzuhalten. Sie muss bei gleichmäßiger Durchmischung von Verbrennungsluft und -gasen für eine Verweilzeit von mindestens 2 sec eingehalten werden.
Reaktionsluft-Zufuhr	Lambda ca. 0,3	Lambda ca. 1,6 – 1,8
Gewährleistete Betriebsstunden pro Jahr	max. 7.500	i.d.R. mind. 8.200
Output-Material		
	Karbonisat mit ca. 20 - 40 % elementarem Kohlenstoff	Asche mit max. ca. 1 - 5 % Kohlenstoff (je nach Feuerungsart) (Primärasche: Rost-, Kessel- und/oder Zyklonasche)
	Produkt mit Restheizwert von ca. 8.000 kJ/kg TS	Nahezu kein Restheizwert im Produkt
	Abfall-Asche und Schlacke aus der Abgasreinigung Kontaminierte Aktivkohle Waschwasser	Abfall-Asche (Sekundärasche: Flugasche aus der Abgasreinigung)
Düngewirkung von Karbonisat bzw. Klärschlammverbrennungsasche	P ₂ O ₅ Anteil im Karbonisat pflanzenverfügbar	P ₂ O ₅ Anteil in der Klärschlammverbrennungsasche nicht pflanzenverfügbar
Rechtliche Einstufung lt. DüMV von Karbonisat bzw. Klärschlammverbrennungsasche	Karbonisat ist nicht als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Düngemitteln zugelassen	Klärschlammverbrennungsasche ist für den direkten Einsatz und als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Düngemitteln zugelassen

Karbonisierungsverfahren:

Aufgrund fehlender Erfahrungswerte für Klärschlammkarbonisierungsverfahren im Allgemeinen wird hier ausschließlich das Karbonisierungsverfahrens der Firma PYREG GmbH bewertet. Für den stabilen Anlagenbetrieb muss der getrocknete Schlamm einen Trockenstoffgehalt von mindestens 85 %, besser 90 % aufweisen. Die thermische Behandlung erfolgt bei ca. 550 - 700 °C unter Zugabe von geringen, kontrollierten Luftmengen. Die Behandlung erfolgt in 2 Stufen: In der ersten Stufe wird ein Gas gebildet, das in der zweiten Stufe verbrannt wird. Die bei der Verbrennung des Gases in der zweiten Stufe der PYREG®-Anlage entstehende Wärme wird zunächst für die erste Stufe der thermischen Behandlung im PYREG®-Reaktor eingesetzt. Die Restwärme kann anschließend, auf einem niedrigeren Temperaturniveau, anderen Wärmeverbrauchern zur Verfügung gestellt werden.

Zurück bleibt bei diesem Verfahren ein Klärschlammkarbonisat. Das Klärschlammkarbonisat enthält ca. 20 - 40 % an elementarem Kohlenstoff und somit einen Heizwert von ca. 8.000 kJ/kg

TS, sowie pflanzenverfügbaren Phosphor. Das Karbonisat ist bislang nicht als Düngemittel bzw. für die Düngemittelherstellung zugelassen.

Die erste installierte PYREG®-Anlage für Klärschlamm war für Kläranlagen mit einer Größenordnung von ca. 50.000 EW konzipiert (d.h. für max. ca. 750 t an getrocknetem Klärschlamm pro Jahr). Mittlerweile, seit ca. 2019, sind Anlagen erhältlich, die in etwa die 3-fache Menge an Klärschlamm (ca. 2.300 t an getrocknetem Klärschlamm pro Jahr) durchsetzen sollen.

Karbonisierungsanlagen erfordern eine Genehmigung nach 4. BImSchV, zudem müssen die Vorgaben der 17. BImSchV für die Emissionsgrenzwerte eingehalten werden. Allerdings ist nach 4. BImSchV lediglich eine Genehmigung nach vereinfachtem Verfahren gemäß § 19 BImSchG, d.h. ohne Öffentlichkeitsbeteiligung, erforderlich. Für die Anlage, die auf der KLA Linz-Unkel errichtet wurde, hat die Genehmigungsbehörde (SGD Nord) zudem auf die von der 17. BImSchV geforderten kontinuierlichen Messungen diverser Emissionen (Gesamtstaub, organische Stoffe, gasförmige organische Chlorverbindungen, gasförmige anorganische Fluorverbindungen, Schwefeldioxid und Schwefeltrioxid, Stickstoffmonoxid und Stickstoffdioxid, Quecksilber und seiner Verbindungen) mit Bezug auf § 24 der 17. BImSchV verzichtet, und statt dessen 4 Einzelmessungen dieser Parameter im ersten Jahr nach der Inbetriebnahme angeordnet. Dies ist nach Dafürhalten der Genehmigungsbehörde ausreichend, weil (Zitat) „ein regelmäßig in gleichbleibender Qualität anfallender Klärschlamm pyrolysiert wird und die eigentliche Verbrennungseinheit (gemeint ist der FLOX®-Brenner) der PYREG®-Anlage mit ausschließlich gasförmigem Brennstoff (gemeint ist das im Prozess gebildete Prozessgas) betrieben wird“.

Klärschlammverbrennung:

Für den stabilen Betrieb einer Klärschlammverbrennung ist lediglich teiltrockneter Schlamm erforderlich. Der Trockenstoffgehalt im Schlamm muss so groß sein, dass eine autotherme Verbrennung des Schlammes, d.h. eine Verbrennung ohne Stützfeuerung mit, z.B. Erdgas, möglich ist. In der Regel ist dies bei Klärschlamm mit einem Trockenstoffgehalt von mind. 40 - 45 % der Fall.

Eine Klärschlammverbrennung muss die Anforderungen der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV) erfüllen. Die 17. BImSchV fordert nach §6 Abs. (1) und (3) bezüglich der Verbrennungstemperaturen, dass (1) „für die Verbrennungsgase... nach der letzten Verbrennungsluftzuführung eine Mindesttemperatur von 850 Grad Celsius ... (3) für eine Verweilzeit von mindestens zwei Sekunden ... eingehalten wird“. Weiterhin fordert die 17. BImSchV nach §5 Abs. (1) und (2), dass die Anlage so zu errichten und zu betreiben ist, dass „in der Schlacke und der Rostasche ein Gehalt an organisch gebundenem Gesamtkohlenstoff von weniger als 3 % oder ein Glühverlust von weniger als 5 % des Trockengewichts eingehalten wird“. Letzteres erfordert die überstöchiometrische Zugabe von Luft, d.h. von Sauerstoff, zur Verbrennung.

Bei der thermischen Klärschlammbehandlung bleibt Klärschlammverbrennungssasche zurück, der darin erhaltene Phosphor ist nur schlecht direkt pflanzenverfügbar. Es sind verhältnismäßig aufwändige chemische Prozesse notwendig um den in der Klärschlammverbrennungssasche enthaltenen Phosphor gut pflanzenverfügbar zu machen. Der Restgehalt an Kohlenstoff in der Asche beträgt max. ca. 5 % TS (in der Regel unter 1 %, bei Wirbelschichtverbrennung gar nahezu vollständiger Ausbrand) und hat somit nahezu keinen weiteren Heizwert. Die gesamte

im Klärschlamm vorhandene Energie wird im Prozess der Verbrennung frei und kann vollständig energetisch genutzt werden.

Asche aus der thermischen Behandlung von Klärschlämmen nach AbfklärV, die für eine Aufbringung nach AbfklärV zulässig ist (DüMV, Anlage 2, 7.3.16), ist als Ausgangsmaterial für die Herstellung von organisch-mineralischen Düngemitteln (DüMV, Anlage 1, Abschnitt 3) zugelassen.

Klärschlammverbrennungsanlagen werden aus Wirtschaftlichkeitsgründen und aufgrund der Herausforderung, die der Anlagenbetrieb u.a. an die Qualifikation der Mitarbeiter stellt, bislang fast ausschließlich für die thermische Behandlung von Mengen von mind. 20.000 - 30.000 t entwässertem Klärschlamm pro Jahr geplant.

All diese Anlagen müssen nach 4. BImSchV genehmigt werden, darüber hinaus müssen die Anforderungen der 17. BImSchV erfüllt werden. Anlagen, die mehr als 50 t an entwässertem Klärschlamm pro Tag, d.h. mehr als 18.250 t/a behandeln, erfordern dabei ein Genehmigungsverfahren nach § 10 BImSchG, d.h. mit Öffentlichkeitsbeteiligung. Dies führt häufig zu einer sehr langwierigen und schwierigen Genehmigungsphase.

Klärschlammkarbonisierungsanlagen stellen im Gegensatz zu Klärschlammverbrennungsanlagen heute grundsätzlich einen dezentralen Lösungsansatz für die Klärschlamm Entsorgung bzw. -behandlung für Kläranlagen von ca. 50.000 bis ca. 150.000 EW (= 750 t TM/a bis ca. 2.300 t TM/a) dar. Voraussetzung hierfür ist aber, dass das Karbonisat als Ausgangsstoff für die Herstellung eines Düngemittels ins europäische Recht bzw. die DüMV aufgenommen werden würde und die Anlage technisch so weit optimiert ist, dass das Verfahren eine mit der Entsorgung des Schlammes in der Verbrennung vergleichbare Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit aufweisen kann. Beide Voraussetzungen sind für die PYREG[®]-Anlage der KLA Linz-Unkel nicht erfüllt.

4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

Der erstmalige kontinuierliche Betrieb einer auf dem Klärschlammkarbonisierungsverfahren der Firma PYREG GmbH basierenden Klärschlammbehandlungsanlage zeigte zum einen, dass einige, während der Planungsphase getroffene, wesentliche Annahmen falsch waren:

- Die installierte Karbonisierungsanlage konnte nicht mit 112,7 k TM/h, sondern maximal mit ca. 90 kg TM/h betrieben werden. Dieses Defizit ließ sich für die KLA Linz-Unkel durch die verlängerte Betriebszeit der Anlage (ca. 6.300 Bh/a statt der geplanten 5.000 Bh/a ausgleichen) und verlängerter Personalanwesenheit und somit erhöhter Personalkosten beheben.
- Die Wärmerückgewinnung aus der Karbonisierung betrug nicht 200 kWh/h wie geplant, sondern maximal ca. 60 kWh/h. Dieses Defizit lässt sich nur durch den Einsatz von Wärme aus alternativen Wärmequellen unter Verwendung fossiler Energieträger und somit erhöhter Energiekosten ausgleichen. Diese Erkenntnis muss bei der Planung weiterer Anlagen zur Klärschlammkarbonisierung berücksichtigt werden.

Zum anderen traten beim Betrieb der Anlage diverse Störungen und unvorhersehbare Probleme auf, die bis auf wenige – jedoch relevante - Ausnahmen behoben wurden:

- Nicht behoben wurde bislang die dringend notwendige technische Optimierung der Wärmeschiene der KLA Linz-Unkel, die sicherstellen sollte, dass die auf der Anlage verfügbare Wärme den Verbrauchern tatsächlich und optimal zur Verfügung gestellt wird (Details hierzu können Kap. 2.3.2, Umsetzung des Verfahrens, Wärmeversorgung, entnommen werden).
- Nicht behoben sind auch die Schwierigkeiten, die Karbonisierungsanlage stabil und betriebssicher über mindestens 4 – 5 d/w bei Vollast (ca. 90 kg TM/h) zu betreiben. (Details hierzu können Kap. 2.3.1, Umsetzung des Verfahrens, Anlagendurchsatz, entnommen werden).

Unterschätzt wurde der Zeitaufwand

- für die Einweisung und Schulung des Betriebspersonals in die neue - ungewohnte – Anlagentechnik und insbesondere
- für die Ursachenforschung im Falle von Schwierigkeiten, die aufgrund der Komplexität der neuen, kontinuierlich arbeitenden Anlage und des notwendigen Zusammenspiels mit bereits auf der Anlage vorhandenen Komponenten eine umfangreiche Bilanzierung und Aufklärung von Zusammenhängen erforderten.

Sehr viel Zeit musste aus diesem Grund insbesondere aufgewendet werden um die Schwachstellen in der Wärmeversorgung des Trockners aufzudecken und Optimierungsmaßnahmen auszuarbeiten.

Zur Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Karbonisierungsanlagen der Firma PYREG GmbH wurden aufgrund der Erfahrungen des Herstellers aus dem vorliegenden Projekt vergleichbare weitere Projekte zudem mit der nachfolgenden Änderung umgesetzt, die für die KLA Linz-Unkel allerdings nicht mit vertretbarem finanziellem Aufwand realisiert werden konnte.

Zur Sicherstellung des für das Abgas der Anlage geforderten Emissionsgrenzwerts für Staub wurde die Anlage der KLA Linz-Unkel nachträglich mit einem Staubfilter als letzter Stufe der Abgasreinigung ausgestattet. Die, der Karbonisierungsanlage auf der KLA Linz-Unkel nachfolgenden, weiteren Anlagen wurden zur Sicherstellung des für das Abgas der Anlage geforderten Emissionsgrenzwerts für Staub mit einem Keramikfilter ausgerüstet, der bereits dicht hinter der Brennkammer installiert ist. Mit einem Keramikfilter direkt hinter der Brennkammer wird das Verstauben aller Anlagenteile, die dem Keramikfilter in der Abgasstrecke nachgeschaltet sind, reduziert, auch das der Wärmetauscher. Dies reduziert den Wartungsaufwand an der Anlage und wirkt sich gleichzeitig positiv auf die Übertragung der Restwärme des Abgases auf den Heizwasserkreislauf, d.h. auf die aus dem Karbonisierungsprozess zurückgewonnene Wärme, aus.

Äußerst demotivierend für alle Projektpartner - Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel und ARGE PYREG/ELIQUO STULZ - war, dass die umfangreichen Bemühungen um die Zulassung des Karbonisats als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff, bzw. zur sonstigen Verwertung bislang gescheitert sind und zudem die Aussichten, dass dieses Ziel in absehbarer Zeit oder überhaupt erreicht werden kann, als gering betrachtet werden müssen.

Ohne die Möglichkeit der Nutzung des Karbonisats als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff, bzw. einer sonstigen Verwertung, sofern die technischen Probleme der Klärschlammkarbonisierungsanlage gelöst werden können, ist die Installation einer solchen Anlage zur Behandlung von Klärschlamm auf einer kommunalen Kläranlage letztlich keine Alternative zur energetischen Verwertung des Klärschlammes in einer Verbrennungsanlage, entsprechend der sich ändernden Rechtslage zur Phosphorrückgewinnung (Klärschlammverordnung).

Das Ziel, mit einer Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammkarbonisierungsanlage die zukunftsorientierte, entsorgungssichere und wirtschaftliche dezentrale Klärschlammverwertung sicherzustellen, ist ohne die Möglichkeit, das Karbonisat als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff, oder sonstigen Wertstoff gemäß Klärschlammverordnung verwerten zu können, nicht zu erreichen.

4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit

Die Ergebnisse, die mit der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel erzielt wurden, insbesondere die der Klärschlammkarbonisierung der Firma PYREG GmbH, können auf andere Kläranlagen mit ca. der gleichen Größe wie die KLA Linz-Unkel d.h. Kläranlagen mit ca. 30.000 bis 50.000 EW, übertragen werden.

Das auf der KLA Linz-Unkel realisierte Vorhaben hat gezeigt, dass ein Klärschlammbehandlungskonzept basierend auf der Klärschlammkarbonisierung, nach derzeitigem Kenntnisstand, nur dann wirtschaftlich auf einer Kläranlage installiert werden kann, wenn die Randbedingungen

auf der KLA zur Wirtschaftlichkeit beitragen, insbesondere muss die benötigte Wärme preisgünstig verfügbar sein.

Des Weiteren zeigte es sich, dass die Karbonisierungsanlage der PYREG GmbH technisch optimiert werden muss: Die Effizienz und der Durchsatz der Anlage müssen gesteigert und die Betriebssicherheit bzw. die Bedienerfreundlichkeit müssen deutlich erhöht werden. Dem hat die PYREG GmbH bei weiteren Installationen auf kommunalen Kläranlagen bereits versucht Rechnung zu tragen.

Entscheidend für die Nutzung der Klärschlammkarbonisierungs-Technologie für die Verwertung des Klärschlammes, d.h. für die Akzeptanz am Markt, ist letztlich der rechtliche Status des Karbonisats und die Möglichkeit der Verwertung als Rohstoff, im Wesentlichen vor dem Hintergrund der Phosphorrückgewinnung, zur Nutzung als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff.

Der Betrieb der Klärschlamm-trocknung und -karbonisierung auf der KLA Linz-Unkel wurde 2022/23 aus den folgenden Gründen eingestellt:

- Die Erfolgsaussichten, in absehbarer Zeit die Nutzung des Karbonisats als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff erwirken zu können, werden vom Zweckverband aufgrund der Erfahrungen in der Vergangenheit als sehr fraglich eingestuft.
- Das Verfahren kann derzeit, ohne dass weitere Investitionen insbesondere in die Wärmeschiene getätigt werden, nicht wirtschaftlich betrieben werden.
- Auch nach Optimierung der Wärmeschiene fehlt preisgünstige Prozesswärme für die Trocknung, d.h. Wärme, die nicht aus der Karbonisierung oder durch die vorhandene Mikrogasturbine aus Faulgas bereitgestellt werden kann. Die fehlende Wärme könnte zwar - wie bisher - über den auf der KLA vorhandenen erdgasbetriebenen Heizkessel zur Verfügung gestellt werden. Der Anstieg des Erdgaspreises in der jüngeren Vergangenheit lässt es aus Gründen der Wirtschaftlichkeit ratsam erscheinen, diese Möglichkeit nur in Ausnahmesituationen zu nutzen.

Alternativ kommt der Ersatz der Mikrogasturbine durch ein Blockheizkraftwerk in Frage. Blockheizkraftwerke können so ausgerüstet werden, dass sie nicht nur mit Faulgas, sondern - alternativ - zusätzlich mit Erdgas betrieben werden können. Im Gegensatz zu Heizkesseln erzeugen Blockheizkraftwerke aus Erdgas nicht nur Wärme, sondern, parallel, Wärme und Strom. Der mit dem Blockheizkraftwerk erzeugte Strom könnte zur Deckung des Eigenbedarfs der KLA genutzt werden. Auch diese Möglichkeit wurde vom Zweckverband bereits geprüft. Der Ersatz der Mikrogasturbine durch ein Blockheizkraftwerk erfordert erhebliche Investitionen (> ca. 300.000 Euro). Vor dem Hintergrund der fehlenden Verwertungsmöglichkeit des Karbonisats als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff sieht der Zweckverband derzeit hiervon ab.

- Verbrennungsanlagen nehmen getrockneten Schlamm und/oder Karbonisat nur ungern an. Die Verbrennung von Karbonisat ist zudem unter energetischen Gesichtspunkten nicht sinnvoll, da ein Teil der enthaltenen Energie bzw. des Kohlenstoffs bereits bei der Karbonisierung frei wird und somit bei der Verbrennung von Karbonisat nicht mehr zur

Verfügung steht. Der Phosphor muss künftig rückgewonnen werden, wodurch eine vorangehende Pyrolyse nach aktuellem Kenntnisstand wenig sinnvoll erscheint.

Für eine zukünftige Wiederinbetriebnahme bzw. Wiederaufnahme des Projektes müssten sich die o.a. Punkte wesentlich verändern und das Projekt vor allem gesamtwirtschaftlich attraktiv werden. In Anbetracht des baulichen Zustandes, vor allem der Klärschlammkarbonisierungsanlage der PYREG GmbH, ist die Wiederinbetriebnahme der vorhandenen seit 2023 stillstehenden Anlagenkombination auf der KLA Linz-Unkel unwahrscheinlich.

5. Zusammenfassung / Summary

Zusammenfassung

Der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel betreibt seit 1993 die KLA Linz-Unkel mit einer Ausbaugröße von 28.800 EW. Die Betriebsführung obliegt den Verbandsgemeinden in Linz/Rhein.

Vor dem Hintergrund steigender Energie- und Entsorgungskosten wurde unter Vorgabe der nachstehenden Ziele

- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Verringerung der Betriebskosten;
- Zukunftsorientierte Sicherstellung der Klärschlammverwertung;
- P-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm und Schließung des Stoffkreislaufes;
- CO₂-Reduzierung;
- Langfristige Stabilisierung der Abwassergebühren;

eine neue Anlagenlinie (Entwässerung, Trocknung, Klärschlammkarbonisierung) zur Behandlung des Klärschlammes konzipiert. Das Kernstück des geplanten Konzepts stellte dabei die thermische Klärschlammkarbonisierung nach dem Verfahren der PYREG GmbH dar.

Karbonisat enthält - neben etwa 20 – 40 % elementarem Kohlenstoff – gut pflanzenverfügbaren Phosphor. Karbonisat könnte damit grundsätzlich direkt als Düngemittelrohstoff verwertet werden, sofern die Vorgaben für Schadstoffgehalte eingehalten werden, und vor allem die rechtliche Zulassung erteilt werden könnte. Aufgrund der aktuellen Gesetzeslage ist dies jedoch nicht möglich.

Der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel hat sich zur Installation einer Karbonisierungsanlage der PYREG GmbH als Kernstück der neuen Klärschlammbehandlung der KLA Linz-Unkel entschlossen, weil man dies als einen dezentralen Lösungsansatz für die Klärschlamm Entsorgung bzw. -verwertung betrachtete, d.h. als eine für kleinere Kläranlagen interessante Alternative zum Verbringen des entwässerten Klärschlammes in eine der großen Klärschlammverbrennungsanlagen, bzw. Mitverbrennungsanlagen.

Die Klärschlammkarbonisierungsanlage der KLA Linz-Unkel war die erste Anlage dieser Art, die in Deutschland für die Verwertung von Klärschlamm installiert wurde. Sie stellte damit ein erstmalig großtechnisch installiertes Verfahren mit Modellcharakter dar, mit Schwierigkeiten bei der Umsetzung war zu rechnen.

Im Zuge der Projektrealisierung wurden verschiedene Optimierungen an der neuen Klärschlammbehandlungsanlage durchgeführt. Damit die Anlage zukünftig wirtschaftlich betrieben werden kann, muss aber insbesondere die Betriebsstabilität der Karbonisierungsanlage weiter erhöht und die Wärmeschiene verbessert werden. Darüber hinaus gibt es bis zum heutigen Tage keine rechtlich anerkannte Möglichkeit, das anfallende Karbonisat direkt als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff zu vermarkten; es muss daher thermisch verwertet werden.

Da der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel derzeit keine Möglichkeit sieht, wesentliche, mit der neuen Anlage verfolgte Ziele zu erreichen (zukunftsorientierte Sicherstellung der Klärschlammverwertung, P-Rückgewinnung aus dem Klärschlamm und Schließung des Stoffkreislaufes) wurde 2022/23 entschieden, den Betrieb der Anlage einzustellen, mögliche weitere Optimierungen zu unterlassen und den - lediglich entwässerten – Klärschlamm bis auf Weiteres direkt in eine energetische Klärschlammverwertungsanlage abzugeben, u.U. bis sich wesentliche Rahmenbedingungen hin zu einem gesamtwirtschaftlichen Betrieb ändern.

Summary:

The Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel has been operating the wastewater treatment plant (wwtp) Linz-Unkel with a design capacity of 28,800 PE since 1993. The municipal enterprise called „Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel“ is responsible for the operational management of the plant.

In view of increasing energy and sludge disposal costs a new concept for the treatment of the sewage sludge (sludge dewatering, sludge drying and sludge carbonization) was developed.

It should meet the following objectives:

- Increasing the economic efficiency by reducing the operating costs
- Future-oriented assurance of the sewage sludge utilization
- P-recovery from the sewage sludge and closure of the substrate cycle
- Reduction of CO₂ emissions
- Long-term stabilisation of the sewage charges.

The core part of this concept was the thermal sewage sludge carbonisation by applying the PYREG®-process.

In this process, microplastics and trace substances are – similar to sewage sludge incineration – depending on temperature to the greatest possible extent safely eliminated from den sewage sludge. PYREG® carbonisate contains plant-available phosphorus, in addition to about 20 – 40 % elementary Carbon. Therefore, carbonisate could be used as raw material for fertilizers, provided that the contaminant content meets the allowants, and especially the legal admission could be conferred. Due to the current legal framework, it is not possible yet.

The „Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel“ decided to install a sludge carbonization plant from PYREG GmbH as the centrepiece of the new sewage sludge treatment plant at the wwtp Linz-Unkel. The reason was, that this was seen as a decentralised solution for sewage sludge disposal and recycling, i.e. as an interesting alternative for smaller sewage treatment plants to sending the dewatered sewage sludge to one of the large incineration plants.

The carbonization plant at the wwtp Linz-Unkel was the first plant of its kind to be installed in Germany. Therefore, with the project has model character, difficulties were to be expected during realisation.

In the course of the project realisation, various optimisations were carried out on the new sewage sludge treatment plant. In order for the plant to be operated economically, in particular the operating stability of the carbonisation unit must be further increased and the heat network must be improved. In addition, there is still no legally flawless, generally recognised way of marketing the carbonate produced directly as a fertiliser or as a fertiliser raw material; it must - still - be disposed of in an incineration unit.

As the Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel therefore no longer see any possibility of achieving the main goals pursued with the new plant (future-oriented assurance of the sewage

sludge utilisation / P-recovery from the sewage sludge and closure of the substrate cycle), the decision was made in 2022/23 to cease operation of the plant, to refrain from any further optimisation and to dispose of the - merely dewatered - sewage sludge directly into incineration until further notice, until an essential change of the basic conditions to an aggregate operation.

6. Literatur

Umweltbundesamt (2012): Positionspapier der Kommission Bodenschutz beim Umweltbundesamt, Uran-Einträge in landwirtschaftliche Böden durch Düngemittel

Wald, L. (2016/2018): Phosphor-Düngewirkung von industriell hergestellten Karbonisaten aus dem Klärschlamm einer kommunalen Kläranlage im Gefäßversuch mit Mais und Weidelgras, Bachelorarbeit, TH Bingen, redigierte Version, Seite 16 – 18

Appel, T., Friedrich, K. (2017): Phosphor-Recycling mit Karbonisaten aus Klärschlamm, Schriftenreihe des Hermann-Hoepke-Instituts, Band 1, S. 52-57

Kuzyakov, Y., Bogomolova, I., Glaser, B. (2014): Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis, *Soil Biology & Biochemistry* 70, S. 229-236)

European Union, EUR-Lex, 03.12.2024, EU-Düngemittelprodukteverordnung, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=CELEX%3A32021R2088>

Verwaltungsgericht Koblenz, 11.07.2024, Urteil im Namen des Volkes, https://vgko.justiz.rlp.de/fileadmin/justiz/Gerichte/Fachgerichte/Verwaltungsgerichte/Koblenz/Entscheidungen/Nr_40-2021_VOE_4_K_1093_20_KO_Urteil_6ad6453f9db74ecf83d4646ebc682ba7.pdf

Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP, 11.07.2024, https://www.bundestag.de/resource/blob/956550/96c18dccf17dec71ebc5fcdd693769c3/Stellungnahme_SV_Dr_Volker_Thome_Fraunhofer_Institut.pdf

7. Anhang

Anhang 1	Konzept der für die KLA Linz-Unkel vorgesehenen Entwässerungs-, Trocknungs- und Karbonisierungsanlage für Klärschlamm laut Planung
Anhang 2	Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014
Anhang 3a	Strom- und Wärmeproduktion Turbine 2020
Anhang 3b	Strom- und Wärmeproduktion Turbine 2021
Anhang 3c	Strom- und Wärmeproduktion Turbine 2022
Anhang 4	Betriebsdaten 2012_2022, Auswertung
Anhang 5	Änderungsgenehmigung vom 30.03.2020
Anhang 6	Übersicht Emissionsmessergebnisse Karbonisierung
Anhang 7	Stoff- und Wärmeströme der Klärschlammbehandlungsanlage Stand Juni 2023
Anhang 8a	Wirtschaftlichkeitsprognose 2014 – Kammerfilterpresse/Landwirtschaft
Anhang 8b	Wirtschaftlichkeitsprognose 2014 – Kammerfilterpresse/Verbrennung
Anhang 9a	Wirtschaftlichkeitsprognose 2014 – Karbonisierung/Düngemittelindustrie
Anhang 9b	Wirtschaftlichkeitsprognose 2014 – Karbonisierung/Landwirtschaft
Anhang 9c	Wirtschaftlichkeitsprognose 2014 – Karbonisierung/Verbrennung
Anhang 10a	Kosten der Klärschlammbehandlung 2018
Anhang 10b	Kosten der Klärschlammbehandlung 2021
Anhang 11	Ergebnisse des Karbonisatanalysen nach DüMV und AbfklärV
Anhang 12	Fotos der Gefäßversuche mit Mais und nachgebautem Weidelgras
Anhang 13	Receipt on product registration_27.09.2018_KEMI
Anhang 14a	Kosten der Klärschlammbehandlung 2021, inkl. Karbonisierung, ohne Kapitaldienst
Anhang 14b	Kosten der Klärschlammbehandlung 2021, nur Entwässerung, ohne Kapitaldienst