

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

Dr. Marianne Buchmüller

Leiterin Kalkulation

ELIQUO STULZ GmbH, Grafenhausen

Helmut Gerber

Geschäftsführer

PYREG® GmbH, Emmelshausen

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

Datum der Erstellung

30.09.2019/Überarbeitung 03.01.2024

Berichts-Kennblatt

Aktenzeichen KfW: NKa3003004	Projekt-Nr.: 3004
Titel des Vorhabens: Bau einer PYREG®-Anlage zur Klärschlammbehandlung	
Autor/-en (Name, Vorname): Dagmar Stirba 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: xxx
	Seitenzahl: xxx
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 wird der Klärschlamm, ähnlich wie bei einer Verbrennung, um die Organik reduziert, hygienisiert und von organischen Schadstoffen entfrachtet; der im Karbonisat enthaltenen Phosphor soll jedoch pflanzenverfügbar bleiben. Im Zuge der Umsetzung erfolgte im Wesentlichen der Ersatz der vorhandenen Kammerfilterpresse durch eine Schneckenpresse, die Implementation eines Niedertemperatur-Bandrockners für die Schlammrocknung und die der PYREG®-Anlage. Die PYREG®-Anlage der KLA Linz-Unkel ist die erste Anlage dieser Art, die in Deutschland installiert wurde. Sie stellt deshalb eine Pilotanlage mit Modellcharakter dar.	
Schlagwörter: Thermische Schlammbehandlung, Klärschlamm Entsorgung, Klärschlammrocknung, Klärschlammkarbonisierung, Klärschlammkarbonisat, Phosphor-Rückgewinnung, Klärschlammbehandlung	
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 (Family Name, First Name): Dagmar Stirba 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: xxx
	No. of Pages: xxx
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®, similar to sludge incineration, the organic content of the sludge is reduced, the sludge is hygienised and organic pollutants are removed; however, the phosphorus which remains in the carbonisate should be plant-available.</p> <p>The most important steps for the realisation 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 PYREG® plant.</p> <p>The PYREG® plant of the wwtp Linz-Unkel is the first plant of this kind which was installed in Germany. It therefore is a pilot plant with model character.</p>	
<p><u>Keywords:</u></p> <p>Thermal Sludge Treatment, Sewage Sludge Diposal, Sewage Sludge Drying, Sewage Sludge Carbonisation, Sewage Sludge Carbonisate, Phosphorus-Recovery, Sewage sludge treatment</p>	
Number of reports delivered Paper form: xxx Electronic data carrier: xxx	Other media: xxx Publication on the Internet planned on the website: xxx

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung	10
1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. der Projektpartner.....	10
1.2. Ausgangssituation	11
2. Vorhabenumsetzung.....	12
2.1. Ziel des Vorhabens.....	12
2.2. Technische Lösung (Auslegung und Leistungsdaten)	16
2.3. Umsetzung des Vorhabens	30
2.4. Behördliche Anforderungen (Genehmigungen)	42
2.5. Erfassung und Aufbereitung der Betriebsdaten	45
2.6. Konzeption und Durchführung des Messprogramms.....	46
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.....	82
3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren.....	84
4. Übertragbarkeit	84
4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung	84
4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts).....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
5. Zusammenfassung/Summary	87
6. Literatur	900
7. Anhang	900

Abkürzungen

a	Jahr
ARGE	Arbeitsgemeinschaft
AbfKlärV	Abfallklärschlammverordnung / Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung
Bh	Betriebsstunde
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
gr	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	MegaJoule
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	Tripelsuperphosphat
UBA	Umweltbundesamt
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
Vol.%	Volumenprozent
WBD	Wissenschaftlicher Beirat für Düngefragen
WHC	Wasserhaltekapazität

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1 Prinzipschema der auf der KLA Linz-Unkel installierten Schlammentwässerung mit Schneckenpresse
- Abb. 2 Foto der auf der KLA Linz-Unkel installierten Schneckenpresse IEA TYP SP-HF 05 XL
- Abb. 3 Prinzip des EloDry®
- Abb. 4 Aufgabe des entwässerten Klärschlamms auf dem Oberband des Bandrockners über die Verteilschnecke
- Abb. 5 Foto des auf der KLA Linz-Unkel installierten Bandrockners EloDry®
- Abb. 6 Vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage
- Abb. 7 Wesentliche geplante Anlagenkomponenten der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel vor Projektstart 2014
- Abb. 8 Vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage nach Installation des Staubfilters
- Abb. 9 Staubmesswerte aus dem Abgas der PYREG®-Anlage 2019
- Abb. 10 2023 tatsächlich installierte wesentliche Anlagenkomponenten der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel
- Abb. 11 Foto der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel
- Abb. 12a Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018
- Abb. 12b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018
- Abb. 12c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018
- Abb. 13a Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019
- Abb. 13b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019
- Abb. 13c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019
- Abb. 14a Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 07.08. . 19.08.2019
- Abb. 14b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019
- Abb. 14c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019
- Abb. 15a Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022
- Abb. 15b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022

- Abb. 15c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners
im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022
- Abb. 16a Schlammumsatz durch den Klärschlammrockner
im Zeitraum vom 11.08. - 13.08.2022
- Abb. 16b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung
im Zeitraum vom 11.08. - 13.08.2022
- Abb. 16c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners
im Zeitraum vom 11.08. -13.08.2022
- Abb. 17a Ertrag an Mais im Gefäßversuch
in Abhängigkeit von der Düngung (\pm Standardfehler)
- Abb. 17b P-Aufnahme des Maises im Gefäßversuch
in Abhängigkeit von der Düngung (\pm Standardfehler)
- Abb. 18a Ertrag an Weidelgras im Gefäßversuch
in Abhängigkeit von der Düngung (\pm Standardfehler)
- Abb. 18b P-Aufnahme des Weidelgrases im Gefäßversuch
in Abhängigkeit von der Düngung (\pm Standardfehler)
- Abb. 19a Laktatlöslicher Phosphor im Boden vor und nach dem Anbau von Mais
- Abb. 19b Laktatlöslicher Phosphor im Boden nach dem ersten und zweiten Schnitt
des Weidelgrases

Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Genehmigungsrechtliche Anforderungen an die Trocknerabluft der KLA Linz-Unkel und Grenzwerte nach TA-Luft
Tab. 2	Ergebnisse der Emissionsmessungen der Trocknerabluft (EloDry® Abluft)
Tab. 3	Massenbilanz für Klärschlamm / Klärschlammkarbonisat 2019 und 2020
Tab. 4	Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsprognosen verschiedener Varianten der Behandlung des ausgefaulten Klärschlammes der KLA Linz-Unkel
Tab. 5	Vergleich der Wirtschaftlichkeitsprognosen von 2014 für die neue Klärschlammbehandlungsanlage mit den 2018 und 2021 ermittelten Kosten
Tab. 6	Chemische Kenngrößen der Phosphordünger
Tab. 7	Nährstoff- und Schwermetallgehalte der Phosphordünger (inverser Königswasseraufschluss, ICP-OES5)
Tab. 8:	Vergleich der wichtigsten Anlagenkenngrößen (Soll lt. Planung / Ist 2023)
Tab. 9	Massenbilanz und Vergleich der Inhaltstoffe von Klärschlamm (KS) und Karbonisat (K) und Bezug auf den P-Gehalt
Tab. 10	Vermiedene CO ₂ Emissionen durch Einlagerung von elementarem Kohlenstoff in das Karbonisat der KLA Linz-Unkel bei Verbringung in den Boden
Tab. 11	LKW-Transporte bei Schlammfäulung und Entwässerung bzw. Schlammfäulung mit nachfolgender Entwässerung, Trocknung und Karbonisierung auf der KLA Linz-Unkel
Tab. 12	Gegenüberstellung wesentlicher Merkmale von PYREG®-Verfahren und KS-Verbrennung

1. Einleitung

1.1. Kurzbeschreibung des Unternehmens und ggf. 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 Gemeindewerken getragen. Die laufenden Betriebskosten werden entsprechend eines aus den Schmutzfrachtmengen ermittelten Umlageschlüssels auf die beiden Gemeindewerke Linz und Unkel verteilt.

Die Zuständigkeit der Betriebsführung des „Zweckverbands Abwasserbeseitigung Linz-Unkel“ oblag während der Realisierung des Projekts der Verbandsgemeindeverwaltung Linz am Rhein, vertreten durch die zuständige Werkleiterin, Frau Dagmar Stirba. Auf der Kläranlage selbst sind permanent 4 Mitarbeiter beschäftigt.

Adressen:

Kläranlage Unkel

Am Bahndamm

53572 Unkel am Rhein

Verbandsgemeindewerk Linz am Rhein / Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel

Am Schoppbüchel 5

53545 Linz am Rhein

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 PYREG®-Anlage

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 EloDry®
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. Das in der Faulung gewonnene Faulgas wird in einer neu installierten Mikrogasturbine verstromt. Dieser Schritt war nicht nur ökologisch sinnvoll, die Faulung des Klärschlammes trägt auch zur Betriebskostensenkung und zur Gebührenstabilität bei.

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

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 für alle Kläranlagen, in denen der Klärschlamm einen Phosphorgehalt von 20 Gramm (gr) und mehr je Kilogramm (kg) Trockenmasse 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 bzw. 50.000 Einwohnerwerten (EW) gestattet.

Das vom Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel formulierte Ziel, zukunftsorientiert, entsorgungssicher und wirtschaftlich die Klärschlammentsorgung 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 war zunächst vorgesehen, künftig nicht nur den Überschussschlamm der KLA Linz-Unkel, sondern auch den der KLA Hallerbach (ca. 8.000 EW) und der KLA Brochenbach (ca. 3.000 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 Klärschlammverwertung autotherm erfolgen kann.

- **Klärschlammkarbonisierung:**

Das Kernstück des geplanten Konzepts stellte die thermische Klärschlammbehandlung nach dem PYREG®-Verfahren dar.

Beim PYREG®-Verfahren wird der getrocknete Klärschlamm bei Temperaturen zwischen 550 und 650 °C karbonisiert. Dabei sollen Mikroplastik und Spurenstoffe aus dem Klärschlamm eliminiert und der Schlamm gleichzeitig von Quecksilber (Hg) und Cadmium (Cd) entfrachtet werden. Genannt wurde von der PYREG GmbH die Entfrachtung des behandelten Schlammes um fast 100 % des enthaltenen Hg und um ca. 50 % des enthaltenen Cd.

Darüber hinaus sollte der im Endprodukt (Karbonisat) enthaltene Phosphor pflanzenverfügbar sein.

Die Pflanzenverfügbarkeit des im Karbonisat einer PYREG®-Anlage enthaltenen Phosphor wurde von der PYREG GmbH als wesentliches Unterscheidungsmerkmal zur Klärschlamm-Asche aus einer Klärschlamm-Monoverbrennung genannt.

Klärschlammkarbonisat aus einer PYREG®-Anlage 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 sind:

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 den Anforderungen der Düngemittelverordnung entspricht.

2. Die Gesetzgebung erlaubt den Einsatz von Klärschlammkarbonisat als landwirtschaftlichen Dünger oder als Ausgangsstoff zur Herstellung von Düngemittel zur bodenbezogenen Verwertung. Das war bei Projektstart nicht der Fall, die Chancen dafür, dass diese Voraussetzung in wenigen Jahren zutreffen würde, wurden von der Betriebsleitung der KLA Linz-Unkel und dem Projektpartner PYREG GmbH aber aufgrund von Gesprächen mit Vertretern der Behörden, insbesondere vom Ministerium für Wirtschaft, Klimaschutz, Energie und Landesplanung Rheinland-Pfalz und des Umweltbundesamts (UBA), als positiv eingeschätzt.

Im PYREG®-Verfahren kann Klärschlamm karbonisiert werden, der einen Heizwert von mind. ca. 10.000 Kilojoule/Kilogramm (kJ/kg) aufweist. Dies erfordert, neben der Klärschlammmentwässerung, auch die Klärschlamm-trocknung auf ≥ 85 % TR. Bei der thermischen Behandlung des getrockneten Klärschlammes in einer PYREG®-Anlage wird Wärme zurückgewonnen. Auf der KLA Linz-Unkel sollte diese zurückgewonnene Wärme zusammen mit der Wärme, die bei der Verstromung des Faulgases in der Mikrogasturbine entsteht, für die Trocknung des Klärschlammes verwendet werden. Des Weiteren stand auf der KLA zusätzlich ein mit Erdgas betriebener Not-Heizkessel zur Verfügung.

PYREG®-Anlage und Trockner arbeiten kontinuierlich. 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-Band-trockner ausgewählt. Außerdem spielte die Anlagensicherheit eine Rolle: Im Gegensatz zu anderen Trocknern, z.B. Dünnschicht- oder Scheibentrocknern, muss bei Band-trocknern 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 dargestellt.

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 Klärschlammbehandlungsverfahren 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 ein großtechnisches Pilotprojekt mit Modellcharakter. Es sollte zum ersten Mal eine PYREG[®]-Anlage in eine Kläranlage in Deutschland integriert und im Dauerbetrieb zur thermischen Behandlung von Klärschlamm eingesetzt werden.

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. Aus diesem Grund schienen PYREG®-Anlagen vor allem für den Einsatz in kleineren und mittleren Kläranlagen (ab ca. 50.000 ES bis max. ca. 150.000 EW) geeignet, d.h. Kläranlagen, die maximal 2 - 3 PYREG®-Anlagen für die vollständige Karbonisierung des anfallenden Schlammes benötigen würden. Für diese Kläranlagen 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 Mono-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 vorliegende 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: min. 2,5 bis max. 5 % TR
Feststoffgehalt nach Entwässerung:	im Mittel 26 % TR Input in die Trocknung: min. 25 bis max. 30 % TR
Feststoffgehalt nach Trocknung:	im Mittel 75 % TR zulässiger Bereich: min. 65 bis max. 85 % TR
Glühverlust:	ca. 55 % TR
Heizwert:	ca. 11.300 MJ/kg TM

Die neue Klärschlammbehandlungsanlage sollte einen durchgehenden Anlagenbetrieb an 4 Tagen unter der Woche erlauben. Ein Anlagenbetrieb über das Wochenende sollte vermieden werden, da die KLA am Wochenende nicht dauerhaft besetzt ist, sondern lediglich ein Bereitschaftsdienst besteht.

Nach Angaben des Herstellers sollte die Leistung der einzigen zum Zeitpunkt des Projektstarts verfügbaren PYREG®-Anlagengröße ausreichen um 563,4 t TM/a in 5.000 Betriebsstunden (Bh)/a zu karbonisieren. Die Anlage sollte bis zu mindestens 7.500 Bh/a betrieben werden können, die restliche Zeit war vorwiegend für Wartungsarbeiten reserviert.

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. 2015/2016 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 KLA's genutzt.

Klärschlammmentwässerung

Als Entwässerungsaggregat wurde bei der Ausarbeitung des Konzepts der künftigen Klärschlammbehandlung zunächst eine Siebbandpresse vorgesehen. Diese entwässert den Klärschlamm mittels Druck und Schwerkraft. 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 betriebssicher erreicht wird. Aufgrund dessen wurde eine Schneckenpresse der IEA Derflinger GmbH (Typ SP-HF 05 XL) auf der KLA Linz-Unkel eingeplant und installiert.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen das Prinzip der installierten Schlammwässerung mit Schneckenpresse sowie ein Bild der Presse.

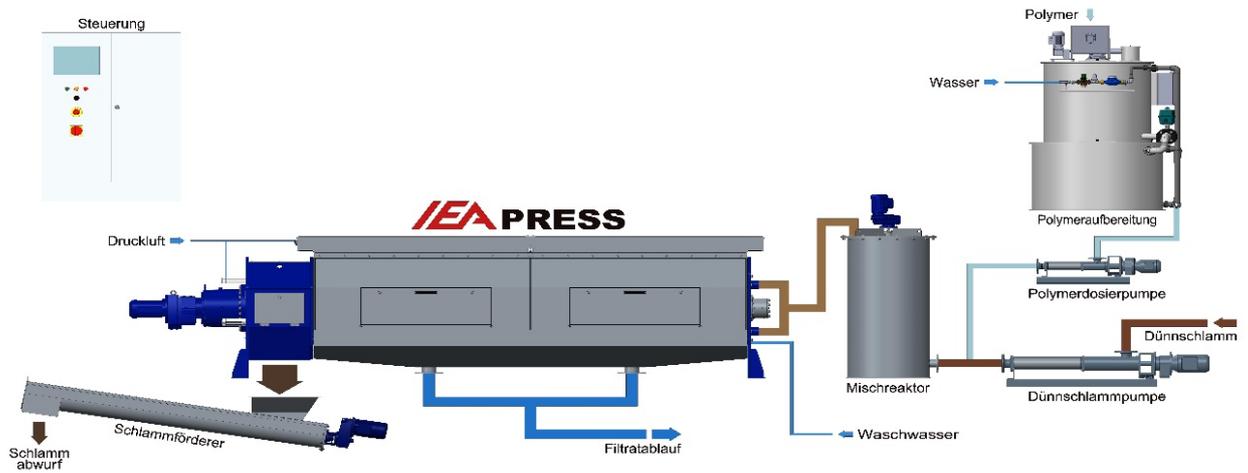


Abbildung 1: Prinzipschema der auf der KLA Linz-Unkel installierten Schlammwässerung mit Schneckenpresse (Quelle: ELIQUO STULZ)



Abbildung 2: Foto der auf der KLA Linz-Unkel 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 ausgereiften Polymerlösung zum Schlamm.

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

Für die Herstellung der Polymerlösung wird 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 wird, kann 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 ist aber standardmäßig mit einem vorgeschalteten Mischbehälter ausgestattet, der für die Polymereinmischung ausreicht. 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 werden in der PYREG®-Anlage zerstört.

Klärschlamm-trocknung

Für die Trocknung des entwässerten Klärschlammes 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.

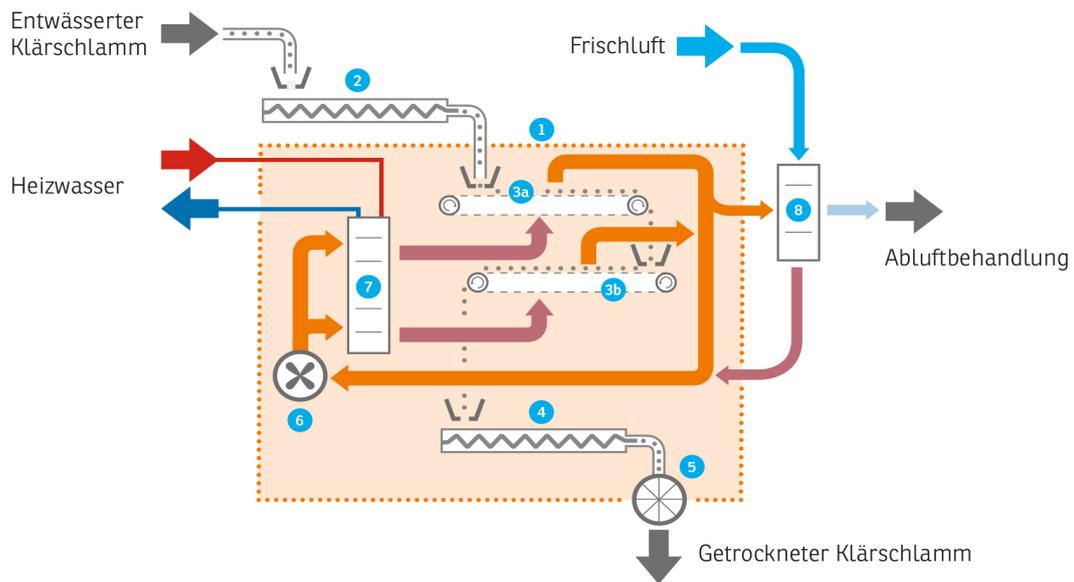


Abbildung 3: Prinzip des EloDry®
(Quelle: ELIQUO STULZ)

Abbildung 3 zeigt die prinzipielle Wirkungsweise des EloDry®:

Im Regelbetrieb (= 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 Niedertemperaturtrocknung ideal ist.

Im Aufgabebereich des Trockners wird der Schlamm von der Verteilschnecke (Abbildung 4) aufgenommen und gleichmäßig auf dem Trockner-Oberband (3a) aufgebracht.



Abbildung 4: Aufgabe des entwässerten Klärschlammes auf dem Oberband des Bandtrockners über die Verteilschnecke
(Quelle: ELIQUO STULZ)

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 Klärschlammteilchen 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 nun getrockneten Partikel von der Austragsschnecke (4) über eine Zellenradschleuse (5) aus dem Trockner ausgetragen und einer Schrägförderschnecke zugeleitet, die sie in den Vorlagebehälter der PYREG®-Anlage überführt.

Alternativ kann der getrocknete Schlamm über die Schrägförderschnecke auch am Vorlagebehälter der PYREG vorbei direkt 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 EloDry®-Trockner zuführt, neben dem Abwurf über dem EloDry® noch über einen zweiten Abwurf verfügt. Über diesen zweiten Abwurf kann der EloDry® umfahren werden: Der entwässerte Schlamm wird bei Umfahrung des EloDry® über den zweiten Abwurf der Zufuhrschnecke unmittelbar der Schrägförderschnecke zugeführt, die das getrocknete Material vom Trockner zum Vorlagebehälter der PYREG® Anlage fördert oder, alternativ, an der PYREG®-Anlage vorbei in einen Container weiterleitet. Falls der Trockner und die PYREG®-Anlage umfahren werden sollen (z.B. bei Wartungsarbeiten an der Anlage), kann der entwässerte Schlamm so direkt aus dem System in einen Container ausgetragen werden.

Die Umfahrung von Trockner und PYREG®-Anlage wurde wie im Konzept vorgesehen umgesetzt. Auf der KLA Linz-Unkel stehen immer mindestens 2 Container zur Verfügung. Wenn statt Karbonisat entwässertes oder getrocknetes Schlamm ausgetragen werden soll,

muss der Container manuell gewechselt werden um ein Vermischen zu vermeiden.

Als Wärmeträger für die Beheizung der Trocknerluft sollte Warmwasser von 85 - 95 °C genutzt werden, welches die Abwärme der Mikrogasturbine, der PYREG®-Anlage und eines bereits auf der Anlage vorhandenen Notheizkessels zum Trockner transportiert. Die geplante und umgesetzte Einbindung von Schlamm-trocknung und Schlammkarbonisierung in das Wärmenetz der KLA ist schematisch in der Abbildung im Anhang 1 dargestellt.

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

In der Abbildung im Anhang 1 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 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 war es, der im Wärmerückgewinnungssystem Nr. 1 bereits abgekühlten Trocknerabluft weitere Wärme zu entziehen - „Abfallwärme“, d.h. Wärme auf niedrigem Temperaturniveau von bis zu ca. 65 °C. Hierfür wurden neben dem bereits erwähnten Luft-/Wasser-Wärmetauscher im Rekuperator/Sprühkondensator auch noch zwei Wasser-/Wasser-Wärmetauscher installiert - der eine davon um Wärme aus dem im Rekuperator anfallenden Kondensat und dem Abwasser des Sprühkondensator zurückzugewinnen, der andere um die im Abwasser des sauren Wäschers enthaltene Restwärme zu nutzen.

Die „Abfallwärme“ sollte für die Nutzung durch die anderen wesentlichen Wärmeverbrauchern der Kläranlage - die Faultürme 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.

Tabelle 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 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 wird noch im Faulschlamm befindliches Methan, das während der Trocknung aus dem Schlamm ausgetrieben wird, im sauren Wäscher nicht reduziert. Aufgrund von Erfahrungen mit anderen Anlagen erschienen über die Installation eines sauren Wäscher hinausgehende Maßnahmen zur Behandlung der Trocknerabluft auf der KLA Linz-Unkel zunächst nicht erforderlich.

Die Klärschlamm-Trocknungsanlage in Linz-Unkel wurde für die folgenden Luftmengen ausgelegt:

ca. 3100 m³ i. N./h, tr., Frischluft

max. 3963 m³ i. N./h, tr.,- Abluft (Summe aus Frischluft und Falschluff)

Hinter dem sauren Wäscher wurde ein Abluftventilator vorgesehen und installiert. Er sorgt für die Absaugung der feuchten Trocknerabluft aus dem Trockner, durch den Rekuperator/Sprühkondensator und den sauren Wäscher und in den Abluftschornstein, und wird so geregelt, dass der Trockner permanent im leichten Unterdruck (ca. 5 bis 15 mbar) betrieben wird. Unkontrollierte Emissionen in die Umgebung werden dadurch vermieden.

Der Bandrockner 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.

Abbildung 5 zeigt ein Foto des auf der KLA Linz-Unkel installierten Bandrockners.



Abbildung 5: Foto des auf der KLA Linz-Unkel installierten Bandrockners EloDry®
(Quelle: ELIQUO STULZ)

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 einzige zum damaligen Zeitpunkt verfügbare PYREG®-Anlagengröße war für die Zufuhr von organischem Material mit einem Brennwert von max. 500 Kilowatt (kW) ausgelegt.

Das PYREG®-Verfahren beruht darauf, dass die organischen Inhaltsstoffe des getrockneten Klärschlammes durch Erwärmen in den PYREG®-Reaktoren auf Temperaturen von 550 - 650 °C und bei geringer Luftzufuhr zu elementarem Kohlenstoff umgewandelt werden. Durch die

geringe Luftzufuhr in die PYREG®-Reaktoren wird das Trockengut verschwelt. Die Luftzufuhr unterscheidet das PYREG®-Verfahren von einer Pyrolyse, die sauerstofffrei arbeitet. Der Luftstrom in die PYREG®-Reaktoren wird kontrolliert zugeführt, er ist soweit reduziert, dass ein deutlich unterstöchiometrisches Verhältnis erreicht wird (λ 0,3). In den PYREG®-Reaktoren entsteht bei der Verschwelung des Klärschlammes neben dem Karbonisat ein brennbares Gas („Prozessgas“). Das Prozessgas wird in einer Brennkammer, die Teil der PYREG®-Anlage und den PYREG®-Reaktoren nachgeschaltet ist, verbrannt. Die gebildete Verbrennungswärme dient zur Beheizung der PYREG®-Reaktoren.

Die auf der KLA Linz-Unkel installierte PYREG®-Anlage besteht 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 Karbonisat austragssystem

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

Falls gewünscht, könnten dem Trockengut in der Schrägförderschnecke zwischen dem Trockengutaustrag und dem Vorlagebehälter der PYREG®-Anlage Zuschlagstoffe zugegeben werden. Die Dosierung von Zuschlagstoffen wird insbesondere im Zusammenhang mit der Reduktion von Schwermetallen in thermisch behandeltem Schlamm diskutiert. Allerdings lagen zum Projektstart hierzu noch wenig Erfahrungen vor. Die Zugabe von Zuschlagstoffen zum getrockneten Klärschlamm vor der Karbonisierungsanlage war für die KLA Linz-Unkel nicht vorgesehen. Klärschlammanalysen während der Konzeptentwicklung hatten darauf schließen lassen, dass das produzierte Klärschlammkarbonisat die Grenzwerte der Düngemittel für Schwermetalle erfüllen wird, ohne dass über die Karbonisierung in der PYREG®-Anlage hinausgehende Maßnahmen erforderlich sind. Aus diesem Grund wurde die Zugabe von Zuschlagstoffen zum getrockneten Schlamm vor der Karbonisierung für die KLA Linz-Unkel nicht eingeplant.

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 Zellenradschleuse eine Temperaturüberwachung installiert. In den beiden PYREG®-Reaktoren findet die Karbonisierung statt. Jeder PYREG®-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 PYREG®-Reaktor erfolgt die kontrollierbare Luftzufuhr.

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 (Bau des Brenners durch die Firma PYREG GmbH in Lizenz der Firma WS-Wärmeprozessstechnik GmbH, Renningen / FLOX®-Verfahren = flammenlose Oxidation; technisches Brennverfahren ohne Flammenbildung mit extrem geringer Stickoxid (NO_x)-Bildung). 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 trotz des relativ hohen Stickstoffgehalts im Klärschlamm nur wenig Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂) und Distickstoffmonoxid (N₂O), 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. Das Abgas verlässt den Doppelmantel der PYREG®-Reaktoren mit Temperaturen von ca. 600 °C. Die beiden Abgasströme werden hinter den PYREG®-Reaktoren anschließend wieder vereint und dem ersten Abgaswärmetauscher zugeführt. Dieser kühlt das Abgas, indem er die Wärme an einen Wasserkreislauf abgibt, der den Klärschlammrockner mit der Abwärme der PYREG®-Anlage versorgt (siehe hierzu Pos. 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. Nach dem 2. Wärmetauscher wird das Abgas, das nun 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 wird jährlich gewechselt und als Abfall entsorgt. 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 Emissionsmessstrecke zur Überwachung der von der Genehmigungsbehörde festgelegten Emissionsgrenzwerte (siehe Genehmigungsbescheid, Anhang 2).

Abbildung 6 zeigt ein vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage.

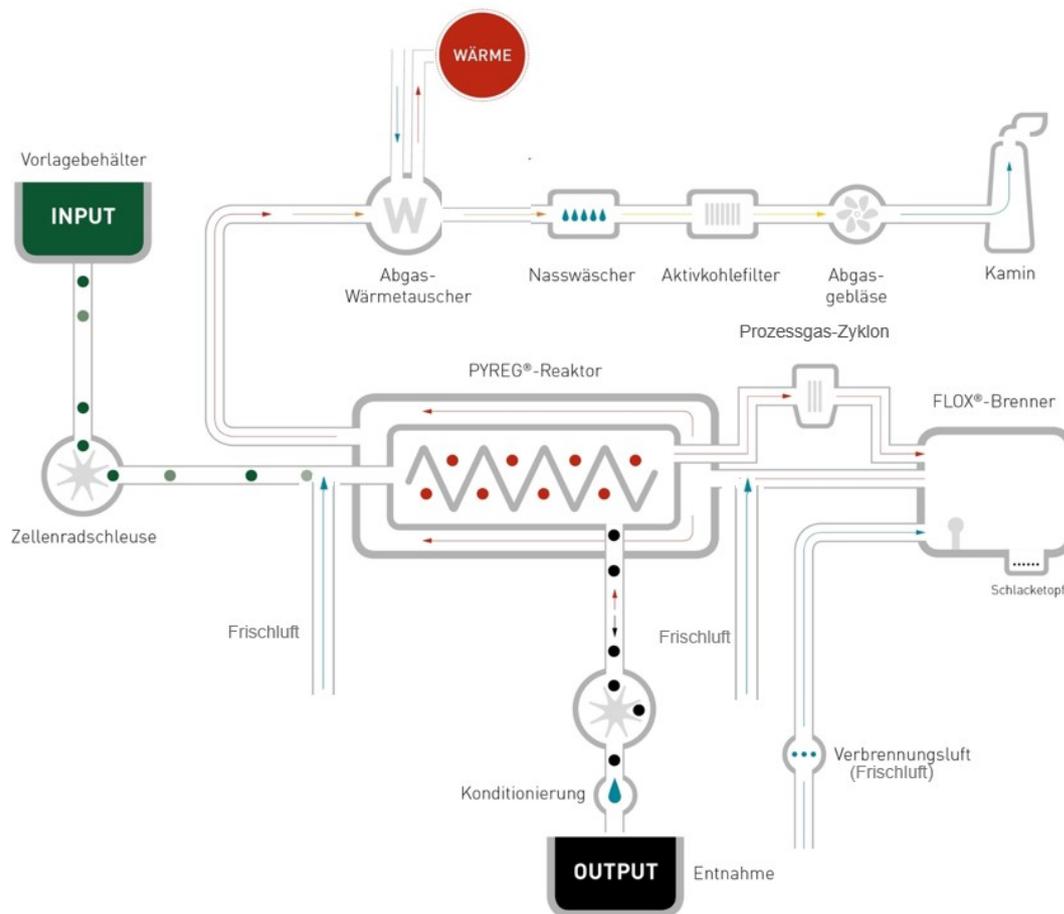


Abbildung 6: Vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage
(Quelle: PYREG GmbH)

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 PYREG®-Reaktoren, die Prozessgasleitung und die gesamte Abgasführung bis nach 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 PYREG®-Reaktoren, durch die Abgaswärmetauscher und die Abgasreinigungsanlage und drücken es durch den Schornstein mit der Emissionsmessstrecke. Einer der beiden Abgasventilatoren ist an einer unterbrechungsfreien Stromversorgung angeschlossen, die bei totalem Stromausfall dafür sorgt, dass der Unterdruck in den PYREG®-Reaktoren und der Gasstrecke aufrecht erhalten bleibt und ein kontrolliertes und gefahrenloses Abfahren der Karbonisierungsanlage erfolgen kann.

Abbildung 7 stellt die wesentlichen Komponenten der geplanten neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel vor Start der Realisierung 2014 schematisch dar. Details können Anhang 1 entnommen werden.

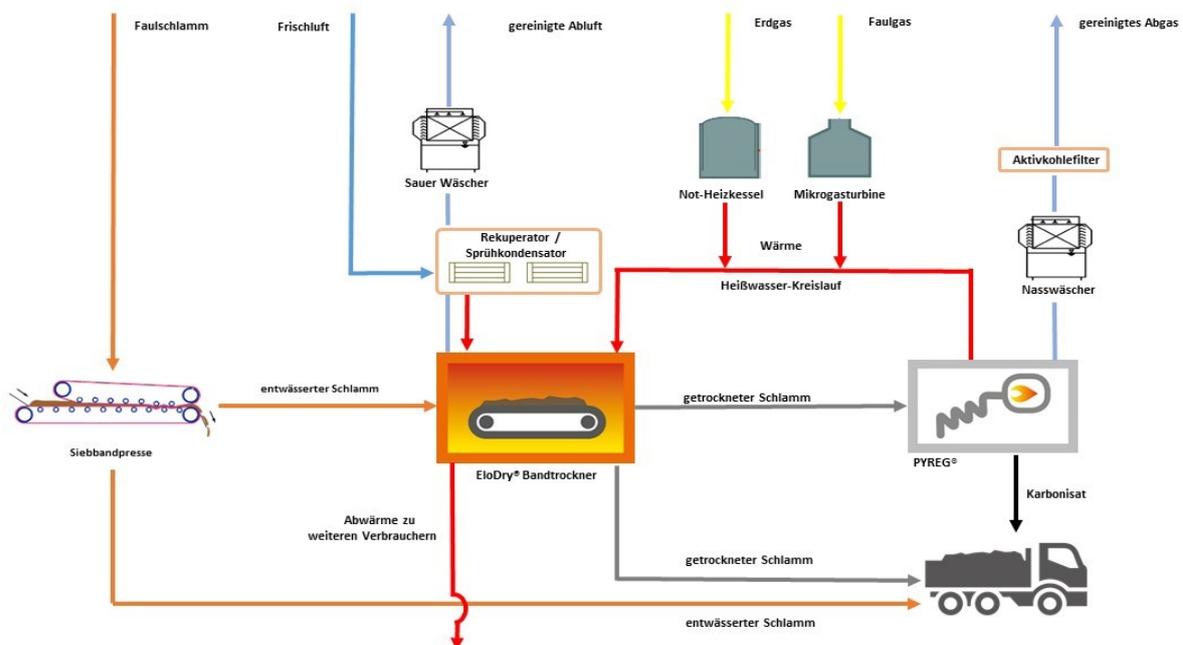


Abbildung 7: Wesentliche geplante Anlagenkomponenten der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel vor Projektstart 2014

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 PYREG®-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 PYREG®-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 Klärschlammmentwässerung 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 Bedienungselement 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.

Anlagenaufstellung

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

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 Bundesimmissionsschutzgesetz (BImSchG) zur Errichtung und zum Betrieb einer thermischen Klärschlammbehandlungsanlage 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 Pos. 2.2., im Kapitel Klärschlammmentwässerung, 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 und so, wie in Pos. 2.2. dieses Berichts beschrieben.

Dabei zeigten sich folgende Schwierigkeiten:

A. Anlagendurchsatz

Geplant war 112,7 kg TM/h 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 Trockenstoffgehalt 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 Pos. 2.2.), in der Regel höher ist. 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 mit bis zu ca. 66 % oTR ermittelt. Bekanntermaßen verschlechtert sich die Entwässerbarkeit von kommunalem Klärschlamm mit steigendem oTR.

Darüber hinaus wurde ab ca. 4. Quartal 2018 beobachtet, dass die Öffnungen der Siebkörbe der Schneckenpresse nach einiger Zeit mit einem pelzigen Belag zuwachsen. Die regelmäßigen Kontrollen des Trockenstoffgehalts im entwässerten Schlamm durch das Personal der Kläranlage zeigten, dass dieser Belag die Entwässerungsleistung der Presse ebenfalls negativ beeinflusst. 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 Mannstunden).

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 nicht leichter und 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 wird (siehe Pos. 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 kommenden Jahren rechnen musste.

Der Klärschlamm der KLA Hallerbach soll 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 wird damit entwässert. Diese Maschine erreicht den geplanten Durchsatz von 112,7 kg TM/h 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 belegen, was die Wärmeübertragung und damit den Durchsatz reduziert. Als Optimierungsmaßnahme wurden auf Wechselrahmen aufgezogene Staubfilter installiert, die das Problem lösen, sofern die Filter regelmäßig gewechselt werden. Der Wartungsaufwand für den Trockner ist dadurch gestiegen (je Filterwechsel sind ca. 4 Mannstunden einzukalkulieren).

- **PYREG®-Anlage**

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 PYREG®-Anlage zugeführt wird, muss auf mind. 90 % TR getrocknet werden um den stabilen Betrieb der PYREG®-Anlage sicherzustellen.
Der auf der KLA Linz-Unkel installierte EloDry® Niedertemperatur-Bandrockner kann 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 ist aber, dass die zusätzlich benötigte Trocknungswärme zur Verfügung steht.
2. Die auf der KLA Linz-Unkel installierte PYREG®-Anlage kann 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. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen liegt der maximal realisierbare Durchsatz mit der auf der Kläranlage Linz-Unkel installierten PYREG®-Anlage bei knapp 100 kg getrocknetem Schlamm/h mit ≥ 90 % TR, d.h. bei ca. 90 kg TM/h.

Die auf der KLA Linz-Unkel installierte PYREG®-Anlage stellt damit die den Durchsatz auf 90 kg TM/h limitierende Komponente beim geplanten Betrieb der gesamten Klärschlammbehandlungsanlage mit Klärschlamm-entwässerung, Klärschlamm-trocknung und Klärschlamm-karbonisierung dar.

B. Wärmeversorgung

Die Wirtschaftlichkeit der Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammkarbonisierungsanlage der KLA Linz-Unkel hängt wesentlich davon ab, dass die für die Trocknung benötigte Wärme preisgünstig ist, bestenfalls kann Abfallwärme genutzt werden.

Laut Planung sollte die Trocknung der 3,22 m³ Klärschlamm mit 26 % TR bzw. 112,7 kg TM, die stündlich in der PYREG[®]-Anlage 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 wird seit 2011 eine Mikrogasturbine zur Verstromung des Klärgases eingesetzt. Diese wurde vor Installation der Klärschlamm-trocknungsanlage gedrosselt betrieben und kann auch mit Erdgas gefahren 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

Seit Inbetriebnahme des Klärschlamm-trockners und der PYREG[®]-Anlage wird 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 und/oder im Winter) geht die Faulgasausbeute der KLA allerdings zurück, sodass der Betrieb der Turbine in dieser Zeit nicht auf dem erforderlichen kontinuierlich hohen Stand gehalten werden konnte. Bei Eintreten eines solchen Betriebszustandes ging deshalb auch der Trockner und die PYREG[®]-Anlage in der Leistung zurück. Dies konnte in Schwachlastzeiten auch unter Zuschaltung des mit Erdgas betriebenen Notheizkessels nicht ausreichend ausgeglichen werden, um den Schlamm-durchsatz von mindestens 90 kg TM/h sicherzustellen. Zudem ist die Zuschaltung des Notheizkessels nicht wirtschaftlich, weil damit nur Wärme erzeugt wird. Wird Erdgas für den Betrieb der Mikrogasturbine eingesetzt, so wird daraus zum einen Strom erzeugt, der zur Eigennutzung auf der KLA zur Verfügung steht. 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 kann. Die Beimengung erfolgt vor der Gaskompressionsanlage in einem Mischungsverhältnis von max. 1:1 Vol.-%.

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 wird.

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. Es wurde außerdem 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, 2021/2022 bei 88 kWh/h resp. 82 kWh/h mit seltenen Spitzen von > 100 kWh/h. Das Heizwasser kann von der Mikrogasturbine außerdem aufgrund der anlageninternen Regelung der Turbine, die sich nicht verändern lässt, nur mit maximal 84°C zur Verfügung gestellt werden.

- **PYREG®-Anlage**

Es kann deutlich weniger Wärme durch die Karbonisierung in der PYREG®-Anlage zurückgewonnen werden als dies vor Projektstart vom Hersteller angegeben wurde. Bei der Auslegung war davon ausgegangen worden, 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 können. Dies entspricht einer Wärmerückgewinnung von ca. 1,42 kWh/kg TM. Die auf der KLA Linz-Unkel gewonnenen Betriebserfahrungen zeigen, dass mit der dort installierten PYREG®-Anlage ca. 0,8 kWh/kg TM zurückgewonnen werden können (Anhang 4, Betriebsdaten 2021/2022, Auswertung). Die Gründe hierfür sind einmal der Wirkungsgrad der Abgaswärmetauscher in der PYREG®, der geringer ist als ursprünglich angenommen wurde, darüber hinaus aber vor allem höhere Energieverluste innerhalb der PYREG®-Anlage aufgrund des Staubfilters, der nach der Inbetriebnahme der Anlage nachgerüstet werden musste um den von der Genehmigungsbehörde geforderten Emissionsgrenzwert für Staub (10 mg/m³ i.N, tr.) sicher einzuhalten (siehe hierzu Pos. 2.3.C., 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 aus der PYREG®-Anlage, die zur Trocknung des Klärschlammes zur Verfügung stünden.

Da die auf der KLA Linz-Unkel installierte PYREG®-Anlage aber nur max. 90 kg TM/h an getrocknetem Klärschlamm karbonisieren kann, können bestenfalls auch nur maximal ca. 70 kWh/h Wärme aus der Karbonisierung für die Trocknung zurückgewonnen werden. Hiervon sind zusätzlich ca. 12 % Wärmeverluste zwischen der PYREG®-Anlage und dem Trockner in Abzug zu bringen (Anhang 4, Betriebsdaten 2021/2022, Auswertung), d.h. tatsächlich kann bei ca. 90 kg TM/h, die karbonisiert werden, mit ca. 60 kWh/h Wärme gerechnet werden, die aus der Karbonisierung am Trockner zur Verfügung stehen.

- **Wärmenetz**

Klärschlamm-trocknung und Klärschlammkarbonisierung wurden in das bestehende Wärmenetz der Kläranlage mit Mikrogasturbine und Notheizkessel als Wärmelieferanten und Faulturm und 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 muss, damit die verfügbare Wärme auch tatsächlich und vollständig für die Verbraucher nutzbar gemacht werden kann.

Ersichtlich wurde dies insbesondere an folgendem:

- Die Heißwasser-Rücklauftemperatur vom Trockner ist permanent zu hoch:

Die Temperaturdifferenz zwischen Heißwasservorlauf zum Trockner und Heißwasserrücklauf vom Trockner beträgt statt ca. 20 Kelvin (K) nur ca. 12 K, d.h. die Wärmeabnahme durch den Trockner ist zu gering.

- Der im Zuge der Wärmebilanzierung ermittelte spezifische Wärmebedarf der Trocknung wird derzeit mit deutlich unter 600 (!) kWh/kg verdampftem Wasser (H₂O) ermittelt (siehe Pos. 2.6.2) Dieser Wert ist für einen stabilen Dauerbetrieb zu niedrig.

- Die Belegung der Lamellenwärmetauscher 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 müssen. Es wird 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 beinhalten auch

die Installation weiterer Wärmemengenmessungen um eine zweifelsfreie Wärmebilanzierung zu ermöglichen.

Die Optimierungsmaßnahmen sollten zunächst in 2023 umgesetzt werden. Hiervon wurde aber letztlich abgesehen. Die Gründe sind in Pos. 4.2. erläutert.

- **Wärmerückgewinnung aus der Trocknerabluft**

Die Effizienz der Trocknung im installierten Bandrockner EloDry® erwies sich im Betrieb als besser als geplant. Zum einen weist die Trocknerabluft ein niedrigeres Temperaturniveau auf als ursprünglich vorgesehen (Temperatur Trocknerabluft, Geplant: ca. 70 °C / Ist: ca. 58 °C). Des Weiteren arbeitet der in der Trocknerabluft direkt hinter dem Trockner installierte Rekuperator, der dazu dient, Wärme aus der Abluft dazu zu nutzen um die Frischluft, die dem Trockner zugeführt werden muss, vorzuwärmen (Wärmerückgewinnungssystem Nr. 1, siehe Abbildung im Anhang 1) sehr effektiv (Temperatur Trocknerabluft hinter Rekuperator, Geplant: ca. 65 °C / Ist: ca. 45 °C). Aus diesem Grund steht 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 - genutzt werden könnte (Wärmerückgewinnungssystem Nr. 2, siehe Abbildung im Anhang 1).

Die Installationen zur Nutzung von Abwärme aus der Trocknerabluft hinter dem Rekuperator (Wärmerückgewinnungssystem Nr.2) wurde folglich 2019 außer Betrieb genommen.

C. 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 sicher eingehalten werden können (Tabelle 2).

Die im Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014 festgelegten Emissionsgrenzwerte für die Trocknerabluft lagen allerdings teilweise deutlich unter den Grenzwerten der TA-Luft, Fassung vom 24. Juli 2002. 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 werden von der auf der KLA Linz-Unkel installierten Anlage eingehalten. Details können Tabelle 2 entnommen werden.

Tabelle 2: Ergebnisse der Emissionsmessungen an der Trocknerabluft (Abluft EloDry®)

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

- **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 PYREG®-Anlage entfernen würden. Dies war nicht der Fall, die Messwerte bei Kontrolluntersuchungen durch ein akkreditiertes Prüfinstitut lagen 2016 und 2018 über dem erlaubten Grenzwert (siehe Anhang 6, Übersicht Emissionsmessergebnisse Karbonisierung). Versuche mit einem zusätzlich eingebauten Elektrofilter Typ Carola® der Firma CCA-Carola-Clean-Air GmbH waren ebenfalls 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 8, nicht dargestellt ist der 2. Wärmetauscher / zum Vergleich siehe Abbildung 6).

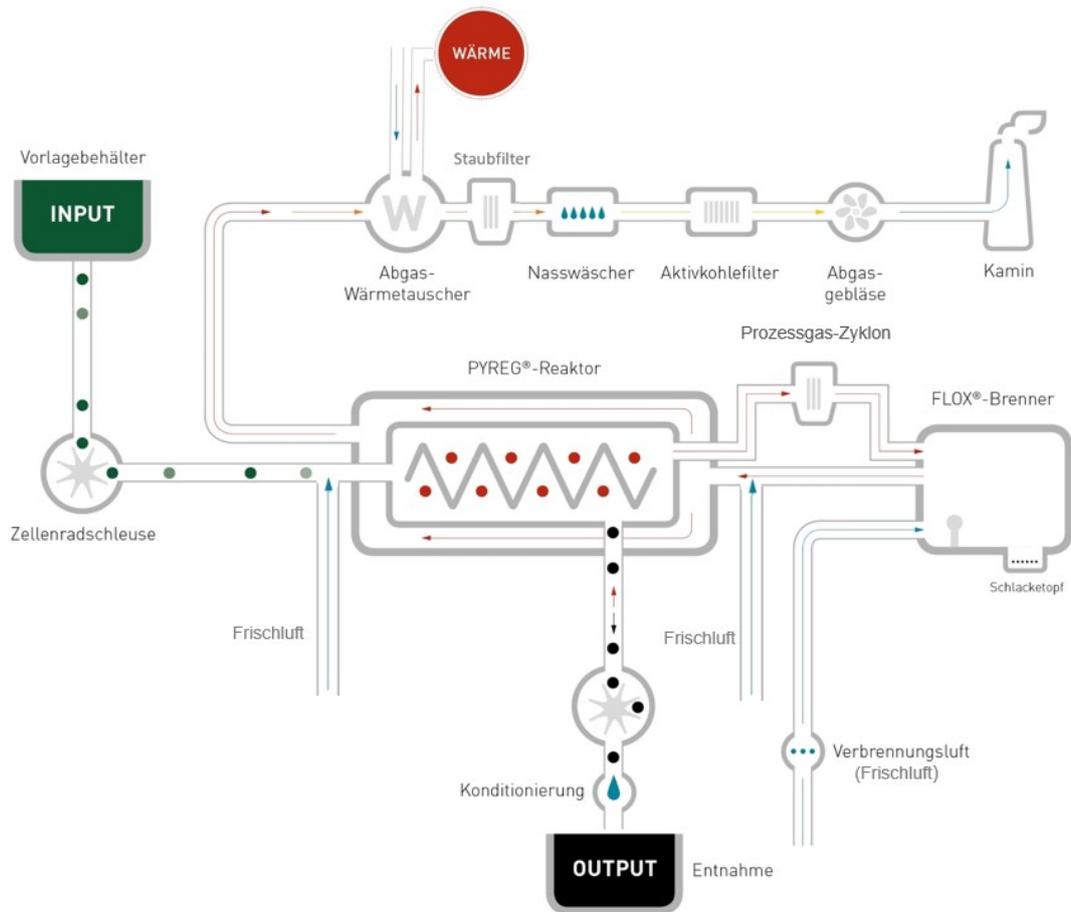


Abbildung 8: Vereinfachtes Verfahrensschaubild der PYREG®-Anlage nach Installation des Staubfilters
(Quelle: PYREG GmbH)

Im Verlauf des Jahres 2019 wurden an der PYREG®-Anlage am Standort der Kläranlage Linz-Unkel an 13 Tagen insgesamt 34 Messungen 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 9 sind die Mittelwerte dieser Messstage dargestellt. Die Fahrweise der Anlage wurde bis zum 03.05.2019 soweit optimiert, dass die Staubemissionen knapp unter dem gesetzlichen Grenzwert von 10 mg/m^3 i.N.tr. gehalten werden konnten. Am 28.05.2019 führte das IUTA (Institut für Energie- und Umwelttechnik), Duisburg, an der Anlage eine Messkampagne durch, um die Abscheideeffizienz des Gewebefilters einzuschätzen. Aus den gemessenen hohen Staubkonzentrationen (Abbildung 9) ließ sich schließen, dass die Filtertaschen Leckagen aufwiesen. Grund dafür war mechanischer Verschleiß.

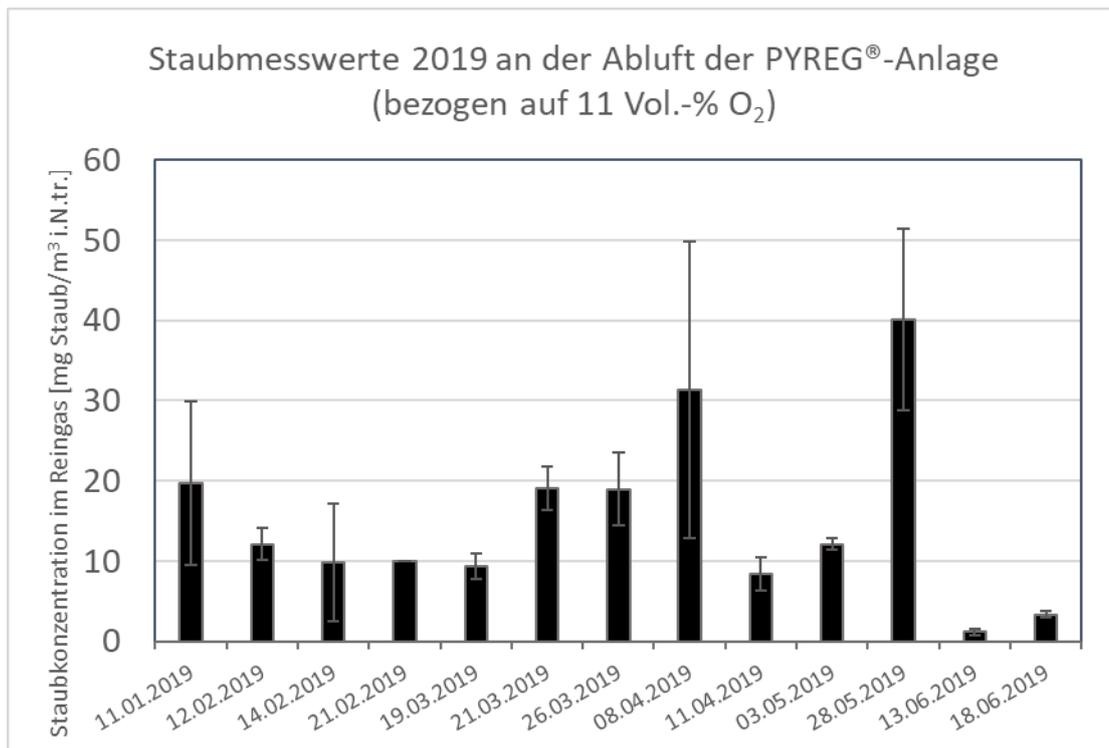


Abbildung 9: Staubmesswerte aus dem Abgas der PYREG®-Anlage 2019

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).

Die Filtertaschen müssen aufgrund der bisherigen Erfahrungen alle 2 Jahre getauscht werden.

Darüber hinaus wurden etliche weitere Optimierungsmaßnahmen im Bereich der Abgasnachbehandlungsanlage an der PYREG®-Anlage durchgeführt:

- die Änderung der Porengeometrie im Kantenspaltfilter für Waschwasser
- 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-Abgaswärmetauscher der Fa. Bomat durch einen Rohrbündelwärmetauscher

Nach Erledigung dieser Umbauarbeiten wurden weitere Emissionsmessungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in der Übersicht im Anhang 6 aufgeführt.

Bei der Messung im September 2021 konnte der im Genehmigungsbescheid vom 14.02.2014 geforderte Grenzwert für Gesamtstaub nicht eingehalten werden. Die Filtertaschen wurden daraufhin erneuert. Bei der Messung im Juli 2022 wurde der Grenzwert für Staub eingehalten, allerdings lag der NO_x-Wert weit über dem Grenzwert. Der Grund hierfür ließ sich nicht feststellen. Mit Bescheid vom 17.10.2022 wurde eine Nachmessung angeordnet; diese ist bislang nicht erfolgt.

Abbildung 10 zeigt schematisch die aktuell, d.h. 2023, nach Abschluss aller Optimierungen tatsächlich installierten, wesentliche Anlagenkomponenten der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel (zum Vergleich siehe Abbildung 7), Abbildung 11 ein Foto der Anlage.

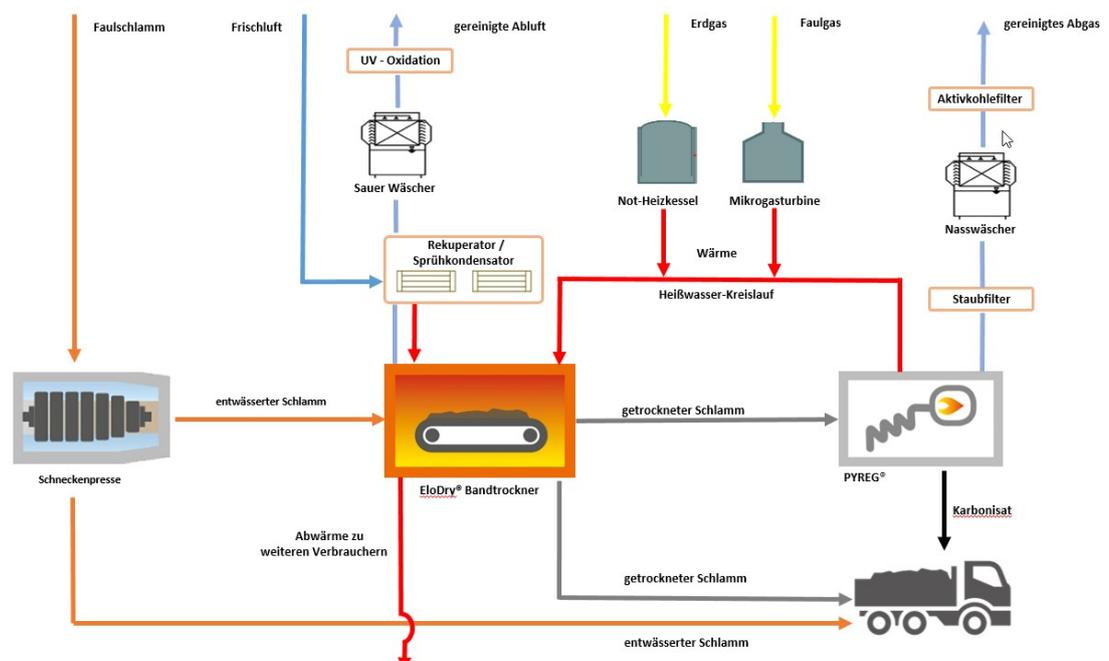


Abbildung 10: 2023 tatsächlich installierte wesentliche Anlagenkomponenten der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel



Abbildung 11: Foto der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel
(Quelle: KLA Linz-Unkel)

Im Anhang 7 sind die Stoff- und Wärmeströme dargestellt, die sich aufgrund der in Pos. 2.3. geschilderten Erfahrungen und der durchgeführten Anlagenoptimierung mit der auf der KLA Linz-Unkel installierten Anlage zur Entwässerung, Trocknung und Karbonisierung von Klärschlamm derzeit bestenfalls realisieren lassen.

Der Vergleich mit der im Anhang 1 dargestellten Planung 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 5000 Bh/a ca. 6250 Bh/a betrieben werden.

- 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 ist 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 Klärschlamm-s 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 Faulschlamm-s wie in Abb. 7 bzw. im Anhang 1 dargestellt und in Pos. 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) ist 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 bei Massivbauweise eventuell spätere Umbauten einfacher und preisgünstiger durchgeführt werden können.
 - 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 die 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 Siebbandpresse für die Schlamm-entwässerung. Die Gründe sind in Pos. 2.2., Technische Lösung, Klärschlamm-entwässerung, 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 Pos. 2.3.C, Abluftemissionen aus der Klärschlamm-trocknung, wiedergegeben.
- der Bau einer Erdgasleitung für die Erdgasversorgung der PYREG®-Anlage
- die bauliche Anpassung des Containers für die PYREG®-Anlage und die Lage des Schornsteins für das Abgas
- der Einbau eines Staubfilters (Gewebefilters) in die Abgasnachbehandlungsstrecke der PYREG®-Anlage. Die Gründe hierfür sind in Pos. 2.3.C., Abgasemissionen aus der Klärschlammkarbonisierung, 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 Pos. 2.2., Technische Lösung, Klärschlammmentwässerung, 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 ist 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) Annahmestätigungen 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 Pos. 2.3.C. beschrieben und in Tabelle 2 dargestellt festgelegt. Die Abluftemissionen mussten erstmals 6 Monate nach Inbetriebnahme der Anlage und dann wiederkehrend alle 3 Jahre durchgeführt werden.
- Die Grenzwerte für die Emissionen aus dem Abgas der PYREG®-Anlage wurden wie in Pos. 2.3.C. beschrieben und im Anhang 6 dargestellt festgelegt. Die Abgasemissionsmessungen mussten nach der vollen Inbetriebnahme der Anlage erstmals über einen Zeitraum von 12 Monaten alle drei Monate und dann wiederkehrend alle 12 Monate durchgeführt werden.
- An der PYREG®-Anlage müssen 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-WerteDie PYREG®-Anlage wurde mit den erforderlichen Messungen und dem notwendigen Protokollierungssystem ausgestattet.
- Es ist ein Betriebstagebuch zu führen, in dem die für den Anlagenbetrieb wesentlichen Daten aufgezeichnet werden, 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 AbhilfemaßnahmenDiese Daten sind 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 werden alle relevanten Betriebsdaten erfasst, überprüft und ausgewertet.

Hierzu gehören insbesondere

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

Soweit möglich und sinnvoll erfolgt die Datenerhebung und -auswertung automatisiert und kontinuierlich über an den Anlagen installierte Messungen und durch Vergleich der Messergebnisse mit Soll-Vorgaben. Diese Daten werden elektronisch im Prozessleitsystem der PYREG®-Anlage oder dem der Schlammbehandlungsanlage abgelegt und teilweise auch im zentralen Leitsystem der KLA.

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

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

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

Mit den Emissionsmessungen an der Trocknerabluft bzw. dem Abgas der PYREG®-Anlage und der Auswertung 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 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 Klärschlamm im PYREG®-Reaktor, korrekt: Klärschlammkarbonisat) erstellt werden.

Tatsächlich wurden die Daten monatlich erhoben. Sie können für die Jahre 2019 und 2020 exemplarisch Tabelle 3 entnommen werden.

Tabelle 3: Massenbilanz für Klärschlamm / Klärschlammkarbonisat 2019 und 2020

KLA Linz-Unkel Klärschlamm Bilanz Jahr 2019				Betriebsstunden PYREG® 4540 h		
2019	Entwässerung		Trocknung / EloDry®		Karbonisierung / PYREG®	
	Ein 2,3-2,7% TR t	Aus 21-24 % TR t	Ein 21-24 % TR t	Aus 75-90 % 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., TM*, kg	ca. 364	ca. 355	ca. 355	ca. 355	ca. 274	ca. 137**
*Trockenmasse						
** 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 entwässerter Klärschlamm		20%	255,3			255,3
getrockneter Schlamm, ges.		75-90%	456			
getrockneter Schlamm zur PYREG®		80-90%	322			
getrockneter Schlamm, Rest / davon zwischengelagert		75-90%	134			119,3
		75-90%	14,7			
Karbonisat		80-90%	161,3			161,3
				ges.		535,9

KLA Linz-Unkel Klärschlamm Bilanz Jahr 2020				Betriebsstunden PYREG® 2351 h		
2020	Entwässerung		Trocknung / EloDry®		Karbonisierung / PYREG®	
	Ein 3,4-3,6 % TR t	Aus 21-24 % TR t	Ein 21-24 % TR t	Aus 75-90 % 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., TM*, kg	ca. 412	ca. 404	ca. 404	ca. 404	ca. 142	ca. 71**
*Trockenmasse						
** 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 entwässerter Klärschlamm		20%	0			
getrockneter Schlamm, ges.		75-90%	460			
getrockneter Schlamm zur PYREG®		80-90%	167,5			
getrockneter Schlamm, Rest / davon zwischengelagert		75-90%	292,5			
		75-90%	67,9			224,65
Karbonisat		80-90%	83,75			83,75
				ges.		308,4

Die Zahlen der Tabelle 3 zeigen den Anfall an entwässerten Klärschlamm der Jahre 2019 und 2020 und das Ergebnis von Trocknung und Karbonisierung.

In beiden Jahren stand auf der Kläranlage noch die ursprünglich, 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 Schlamms über eine mobile Schlammentwässerungsanlage, d.h. durch einen Lohnentwässerer, entwässert werden.

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

Allerdings konnte die PYREG[®]-Anlage nicht ausreichend stabil betrieben werden: Mit der Anlage wurden in beiden Jahren deutlich weniger als die vom Hersteller angegebenen bis zu max. 7500 Bh/a bei Volllastbetrieb erreicht. Aus diesem Grund konnte nur ein Teil des getrockneten Schlamms karbonisiert werden, ein Teil musste in getrockneter Form entsorgt werden und ein (kleinerer) Teil des getrockneten Schlamms wurde zwischengelagert. Letzterer wurde vom Kläranlagenpersonal portionsweise manuell wieder in den Vorlagebehälter der PYREG[®] eingebracht, solange die PYREG[®]-Anlage stabil in Betrieb war und sofern die aktuell anfallende, frisch getrocknete Menge an Schlamm eine Ergänzung durch das „alte“, zwischengelagerte trockene Material zuließ.

Die in Tabelle 3 angegebenen Mengen an erzeugten Karbonisat sind fehlerhaft, sie sind zu niedrig. Dies hat folgenden Grund: Bei Stillstand der PYREG[®]-Anlage 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 müssen aber manuell umgesetzt werden. Um sortenreines Karbonisat sicherzustellen, erfolgte das Umsetzen des Containers insbesondere nach einem Wiedereinfahren der PYREG[®]-Anlage erst, wenn alle Reste an getrocknetem Schlamm sicher aus dem System ausgebracht worden waren. Aus diesem Grund entsprechen die in Tabelle 3 angegebenen Mengen an erzeugten Karbonisat, die durch Auswiegen des Inhalts des Karbonisat-haltigen Containers ermittelt wurden, nicht der tatsächlich erzeugten Menge; sie sind zu gering.

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

Die Energiebilanz der neuen Klärschlammbehandlungsanlage, inklusive Trocknung und thermischer Behandlung im PYREG[®]-Reaktor, sollte laut Zuwendungsbescheid vierteljährlich erstellt werden.

Die wesentliche Wärme- und Stoffstromdaten werden 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 2021/2022 finden sich im Anhang 4 beigelegt.

Bislang ist es nicht gelungen, die Klärschlamm-trocknung und Klärschlamm-karbonisierung der KLA Linz-Unkel wärmeenergetisch zweifelsfrei und nachvollziehbar zu bilanzieren.

Dies hat folgende Gründe:

Nach der Anlageninstallation, ab ca. Anfang 2016, musste zunächst viel Zeit investiert werden um ein geregeltes Zusammenspiel der verschiedenen Anlagenkomponenten – Schneckenpresse, Trockner, PYREG®-Anlage und Wärmeversorgung – zu erreichen. Besonders schwierig wurde dies durch häufige Anlagenstillstände der PYREG®-Anlage und durch die Probleme mit der Wärmeversorgung durch die Mikrogasturbine.

Wesentliche anlagentechnische Erkenntnisse der Jahre 2016/2017 waren, dass

- der getrocknete Klärschlamm auf mind. 90 % Trockenstoff getrocknet werden muss, damit ein stabiler Betriebszustand der PYREG®-Anlage erreicht wird
- die Mikrogasturbine um eine Erdgasbeimengung nachgerüstet werden muss
- die Trocknerabluft nach dem Rekuperator auf einem zu niedrigen Temperaturniveau anfällt, als dass sich hieraus noch Abfallwärme für die sonstigen Verbraucher der KLA (Faulturm, Betriebsgebäude) zurückgewinnen ließe.

Nach erfolgter Nachrüstung der Mikrogasturbine blieben weiterhin die Probleme mit den häufigen Anlagenausfällen der PYREG®. 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.

2018/2019 konnten dennoch wiederkehrend stabile Betriebszustände erreicht werden, die auch graphisch ausgewertet werden konnten. Diese finden sich in den nachfolgenden Diagrammen der Abbildungen 12a-c, 13a-c und 14 a-c.

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.

Abbildungen 12a-c: Ergebnis der graphischen Auswertungen vom 26.11. - 04.12.2018

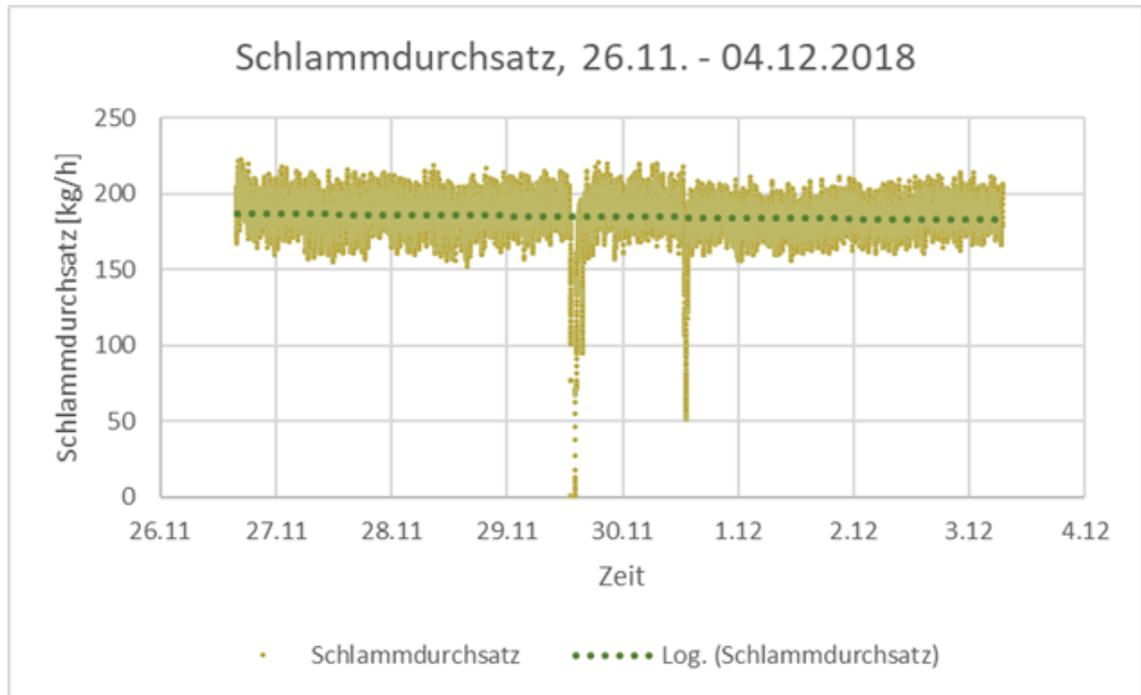


Abbildung 12a Schlammumsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018

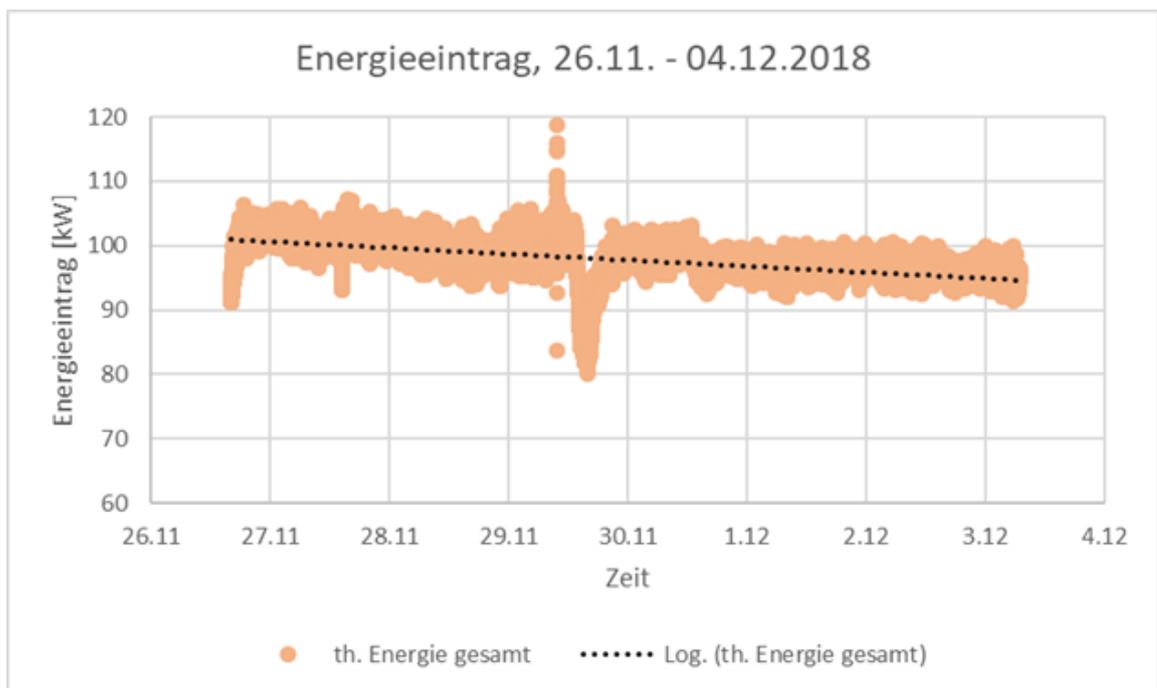


Abbildung 12b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018

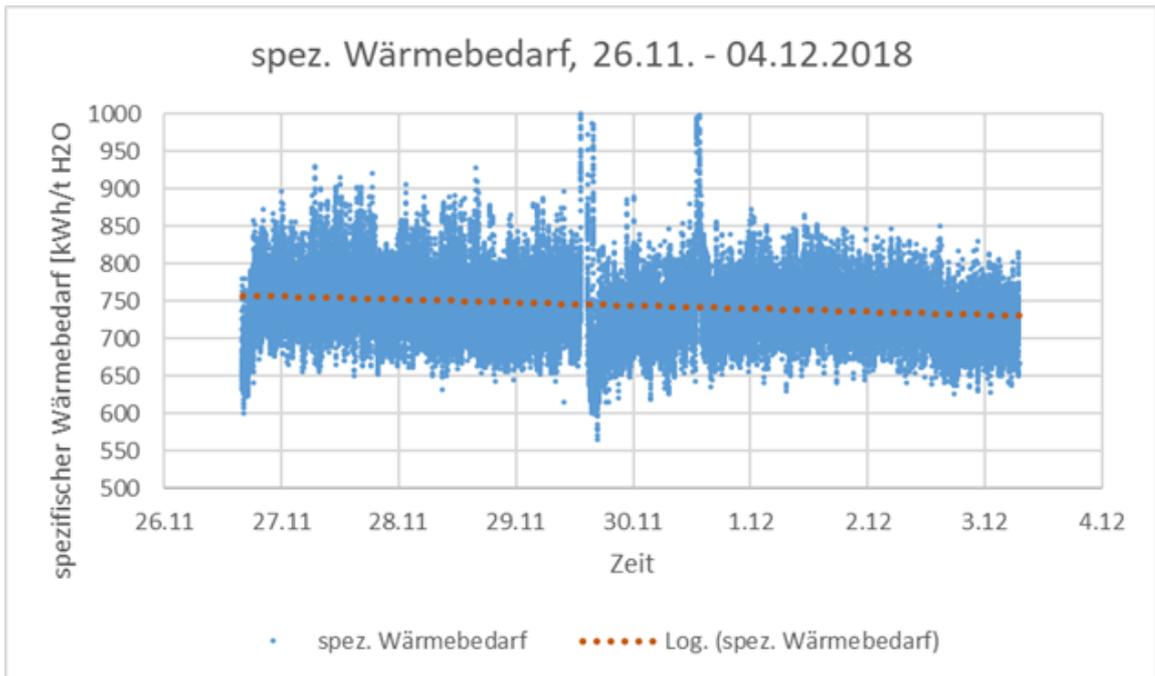


Abbildung12c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlammrockners im Zeitraum vom 26.11. - 04.12.2018

Abbildungen 13a-c: Ergebnis der graphischen Auswertungen vom 11.04. - 25.04.2019

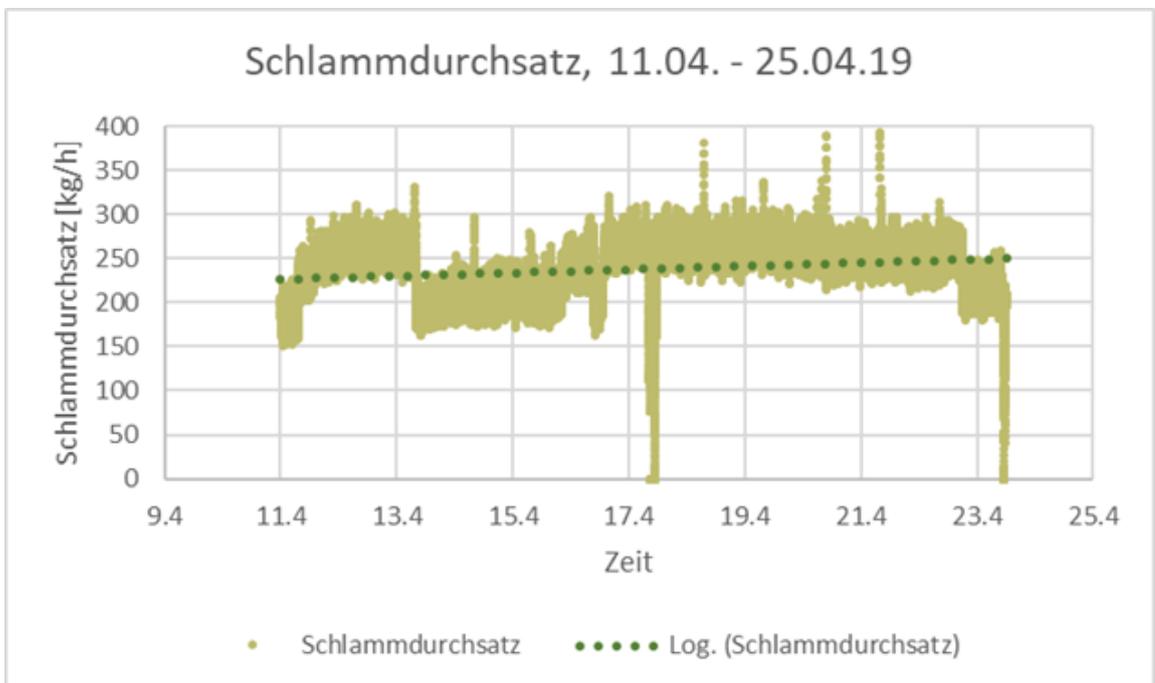


Abbildung 13a Schlammdurchsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019

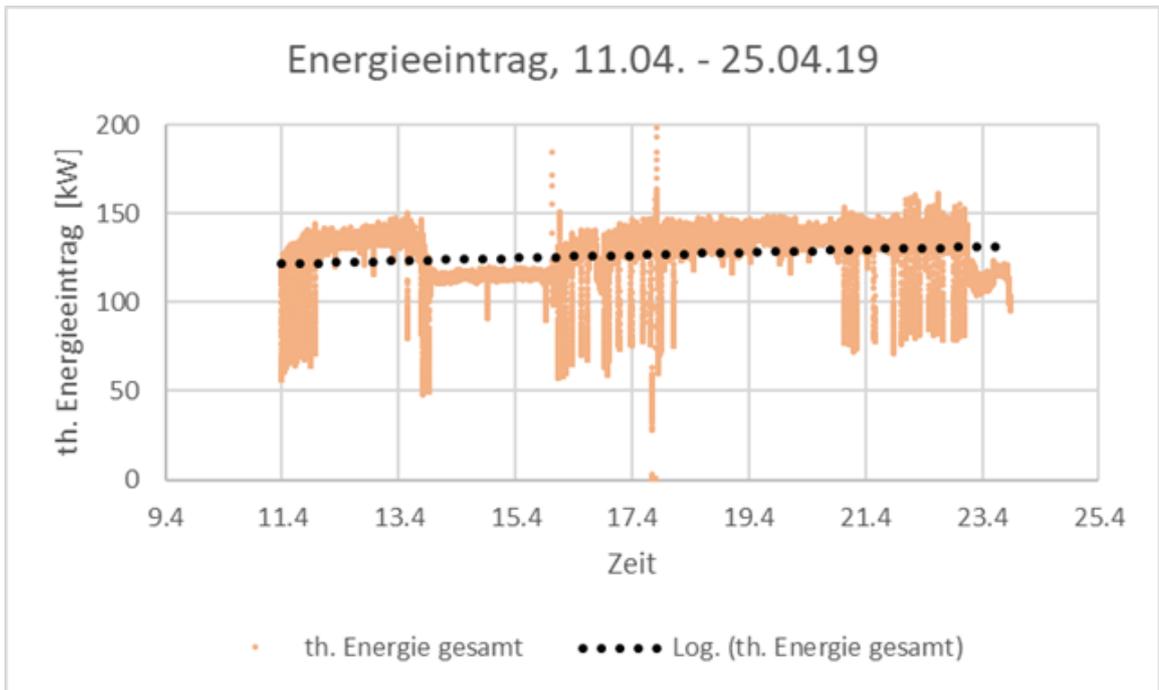


Abbildung 13b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlamm-trocknung im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019

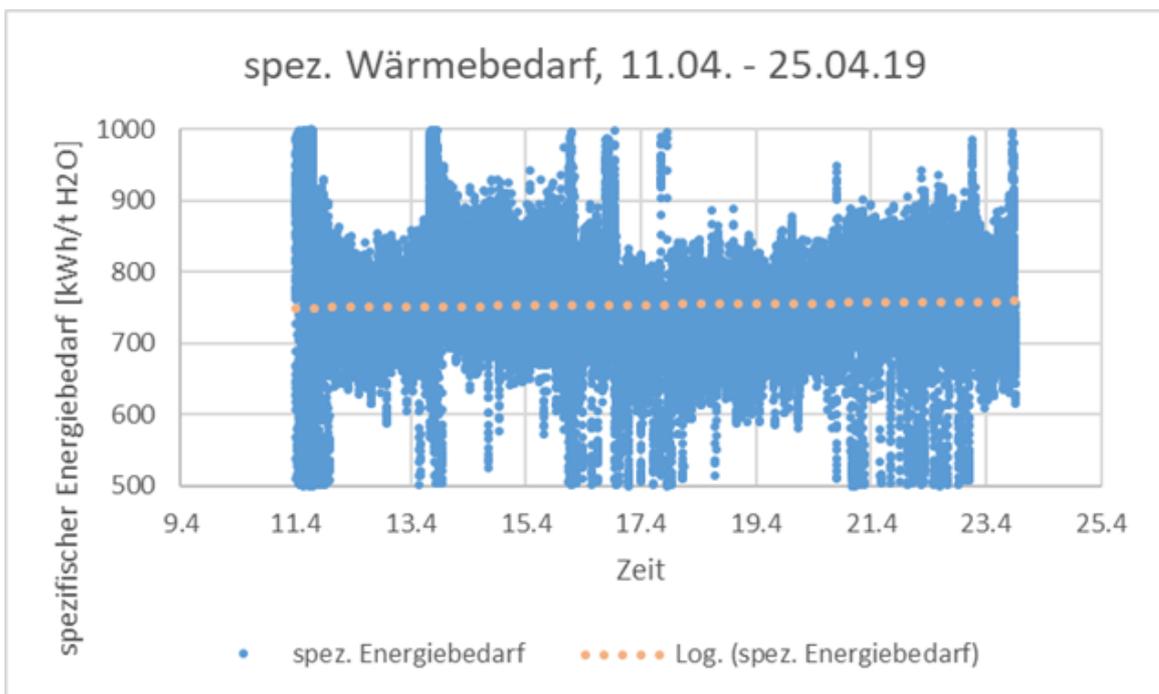


Abbildung 13c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm-trockners im Zeitraum vom 11.04. - 25.04.2019

Abbildungen 14a-c: Ergebnis der graphischen Auswertungen vom 07.08. - 19.08.2019

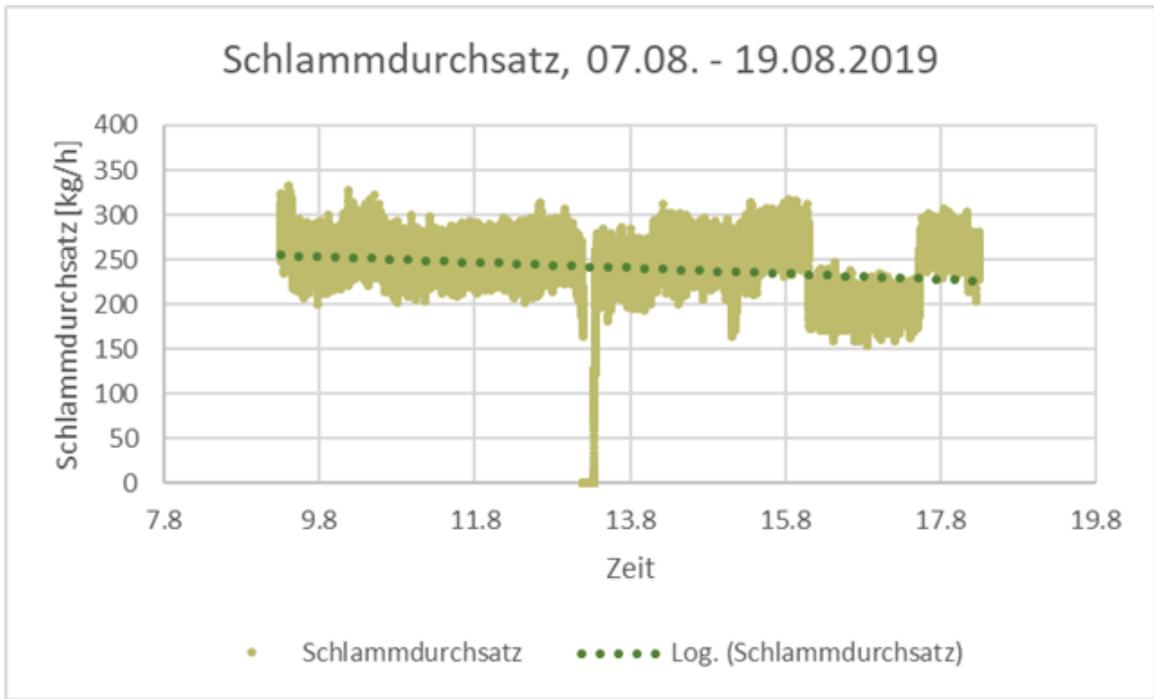


Abbildung 14a Schlammumsatz durch den Klärschlamm-trockner im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019

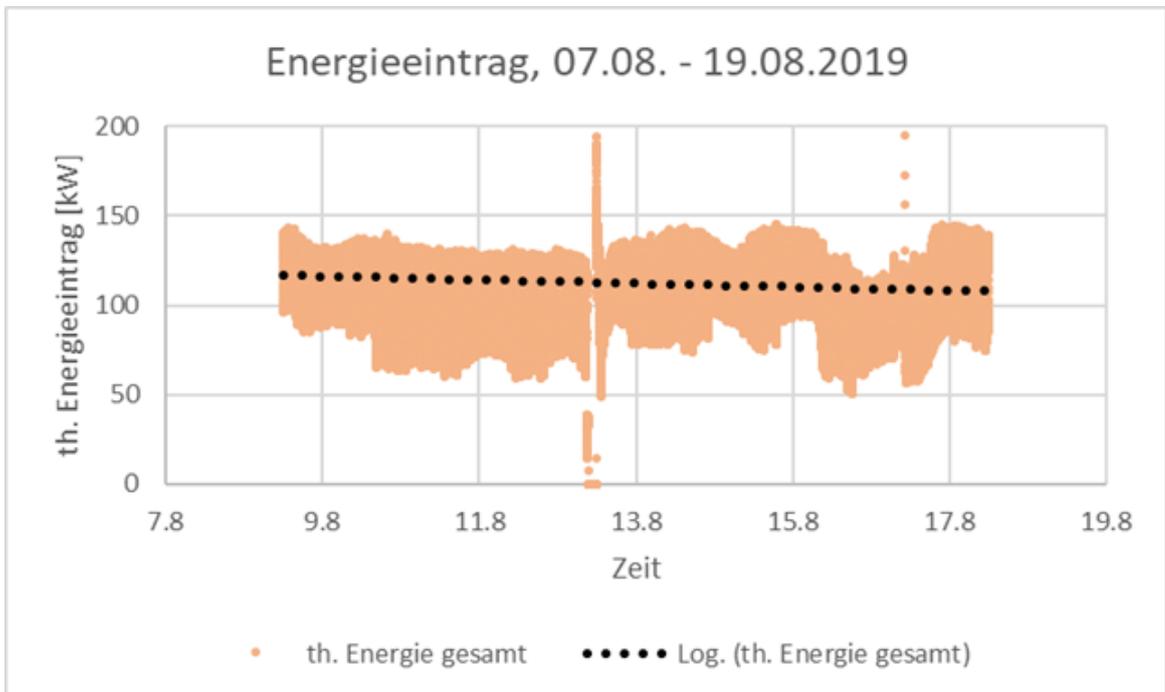


Abbildung 14b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlamm-trocknung im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019

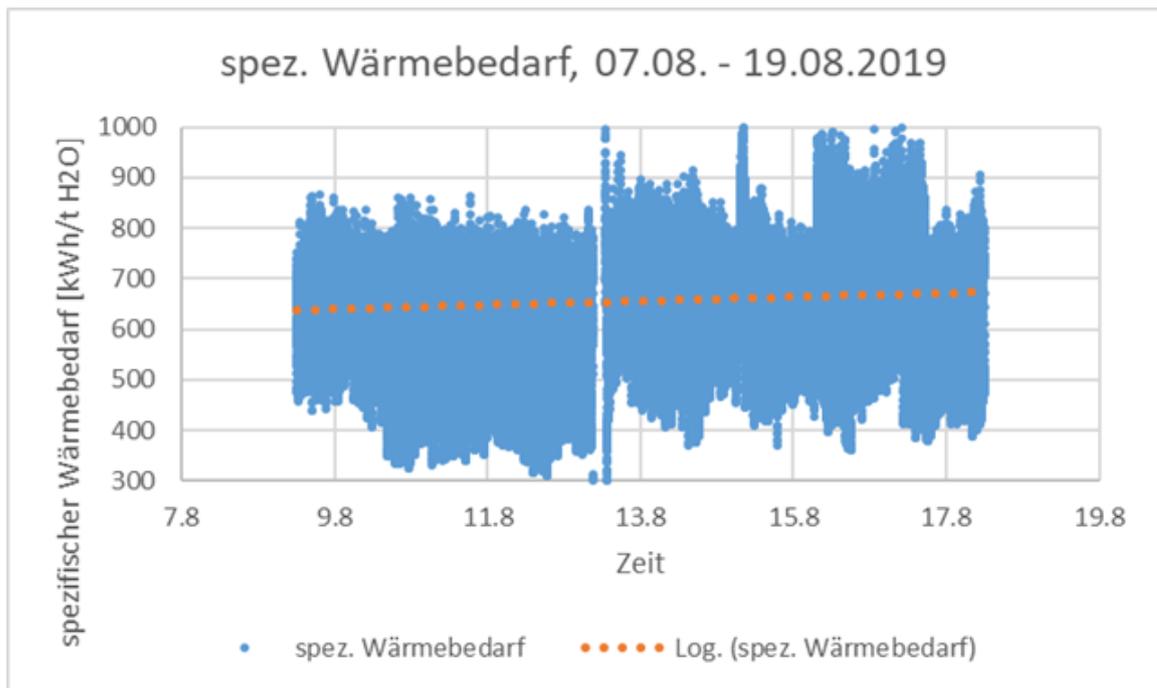


Abbildung 14c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm Trockners
im Zeitraum vom 07.08. - 19.08.2019

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 bedeutet, 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-Band Trocknern, die mit dem EloDry® vergleichbar sind, wird 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_{verdampf} gewährleistet worden. Die Tabellen zeigen, dass die in auf der KLA Linz-Unkel installierte Trocknung sehr effizient arbeitet, 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 PYREG® konnten über den Betrachtungszeitraum (2018 - 2019) aufgrund der Schwierigkeiten einen stabilen Dauerbetrieb aufrecht zu erhalten, keine zuverlässigen Werte für die für die Trocknung bereitgestellte Abwärme ermittelt werden.

2019/2020 wurde, neben weiteren Optimierungsmaßnahmen an der PYREG®-Anlage, die Schneckenpresse ausgetauscht. Darüber hinaus rückte die unbefriedigende

Wärmelieferung durch die Mikrogasturbine und das Wärmeversorgungssystem in den Fokus. Anfang 2021 wurde die größere Schneckenpresse in Betrieb genommen. Sie erlaubt 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 zeigen, dass die Mikrogasturbine nach der Reinigung bzw. dem Umtausch des Wärmetauschers maximal zwar nicht die geplanten 101 kWh/h, aber in der im Durchschnitt mind. 80, max. 90 kWh/h Abwärme erzeugt (Anhang 3b und 3c).

Sie zeigen darüber hinaus (Anhang 4), dass die Wärme, die die Mikrogasturbine und der Heizkessel 2021 erzeugen (2021/2022 im Mittel ca. 150 kWh/h), nur zu knapp 50 % für die Trocknung genutzt wird. Da der Wärmebedarf der sonstigen Verbraucher der Kläranlage vor Projektstart mit max. 50 kW im Sommer und max. 80 kW im Winter ermittelt wurde, muss davon ausgegangen werden, dass ein Teil der verfügbaren Abwärme, die den sonstigen Verbrauchern zugeleitet wird (2021/2022 im Mittel 84 kWh/h) überhaupt nicht genutzt, sondern vernichtet wird.

Der extrem - unrealistisch - niedrige spezifische Wärmebedarf, der sich 2021/2022 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.

Die Situation bei der Trocknung ist nachfolgend exemplarisch graphisch für den Zeitraum vom 18.07.2022 - 26.08.2022 (Abbildungen 15a-c) bzw. 11.08.2022 - 13.08.2022 (Abbildungen 16a-c) dargestellt. Die häufigen Betriebsunterbrechungen sind anhand der Darstellungen für den Zeitraum vom 18.07.2022 - 26.08.2022 (Abbildungen 15a-c) gut erkennbar. Sie rühren daher, dass die Zufuhr von entwässertem Schlamm zum Trockner unterbrochen wird, sobald über trockeninterne Temperaturmessungen festgestellt wird, dass der Schlamm während dem Transport durch den Trockner nicht ausreichend getrocknet wird. Der Trockner geht dann in die „Nachrocknung“ über – die Schlammzufuhr wird so lange unterbrochen und das Trocknerband steht so lange still, bis der im Trockner befindliche Schlamm den vorgegebenen Trocknungsgrad erreicht hat.

Ergebnis der graphischen Auswertungen vom 18.07. - 26.08.2022

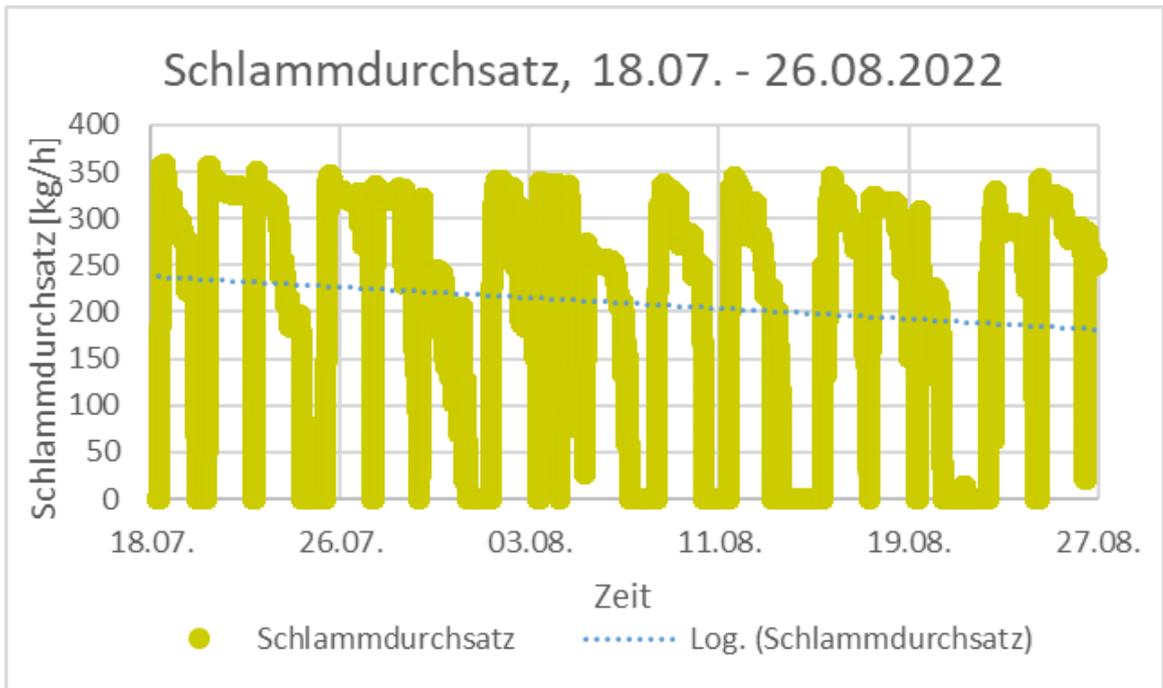


Abbildung 15a Schlammumsatz durch den Klärschlammrockner im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022

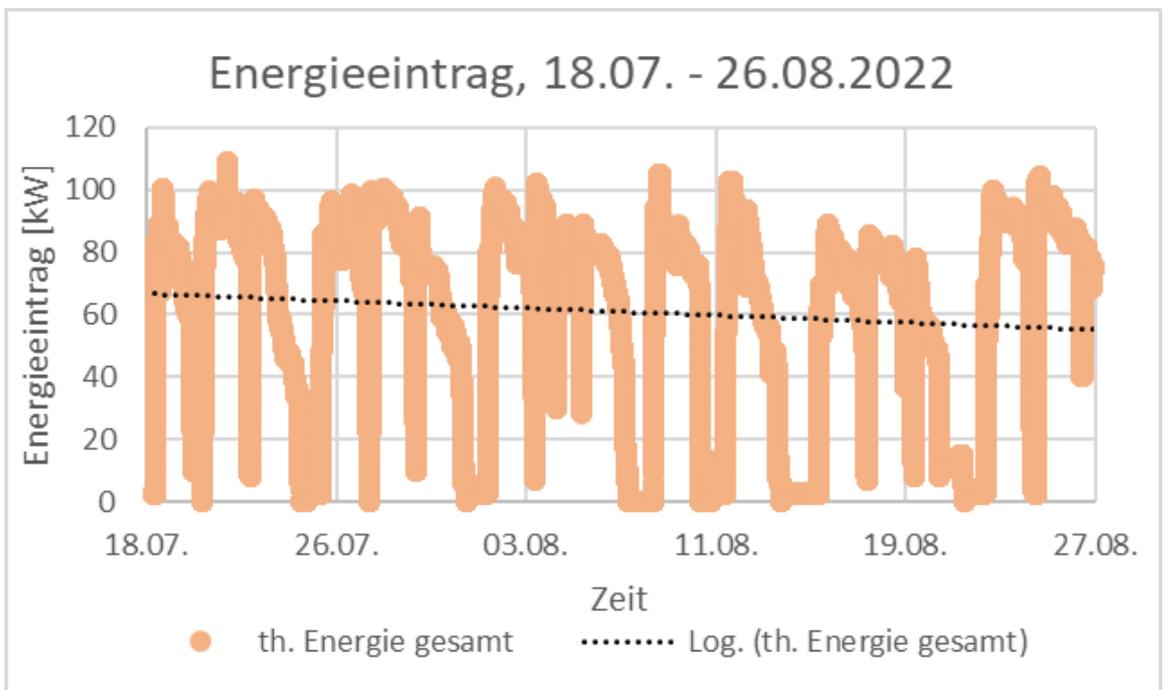


Abbildung 15b Wärmeenergieeintrag in die Klärschlammrocknung im Zeitraum vom 18.07 - 26.08.2022

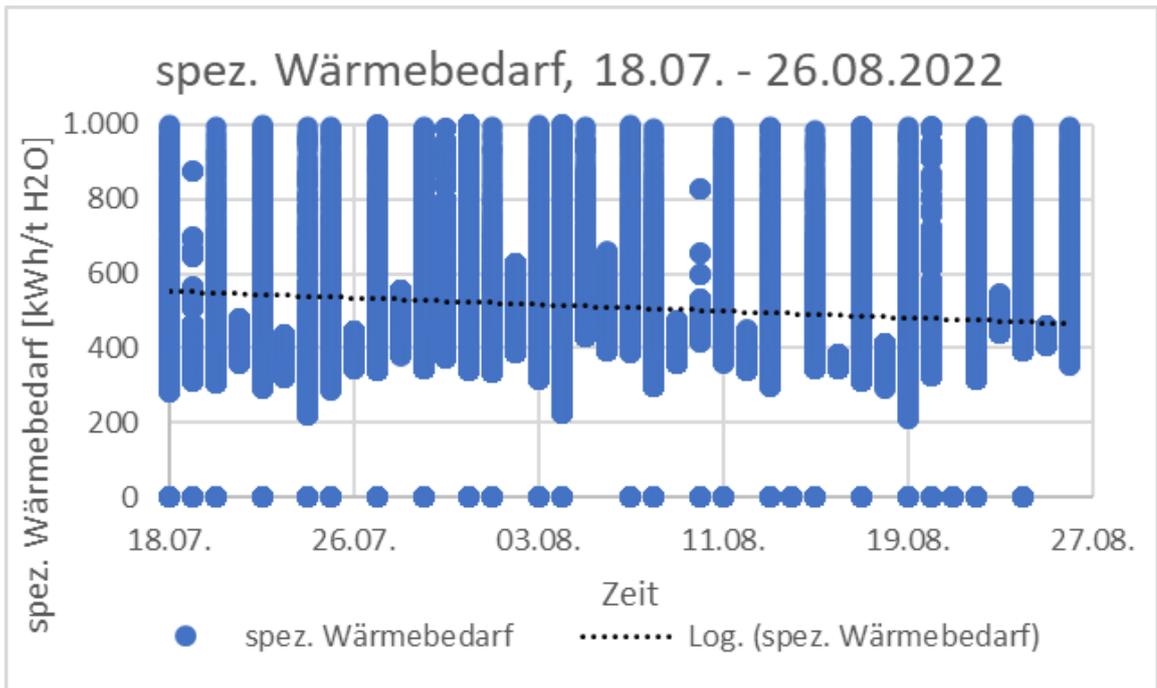


Abbildung 15c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm-trockners im Zeitraum vom 18.07. - 26.08.2022

Ergebnis der graphischen Auswertungen vom 11.08. - 13.08.2022

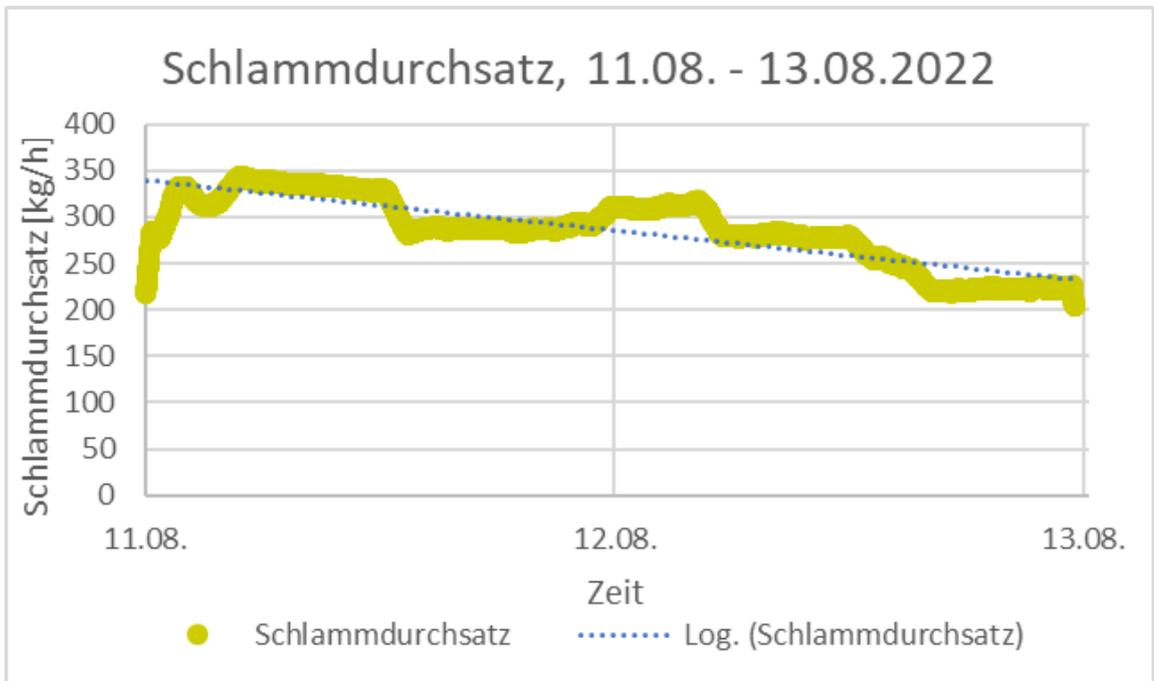


Abbildung 16a Schlamm-durchsatz durch die Klärschlamm-trocknung im Zeitraum vom 11.8. - 13.08.2022

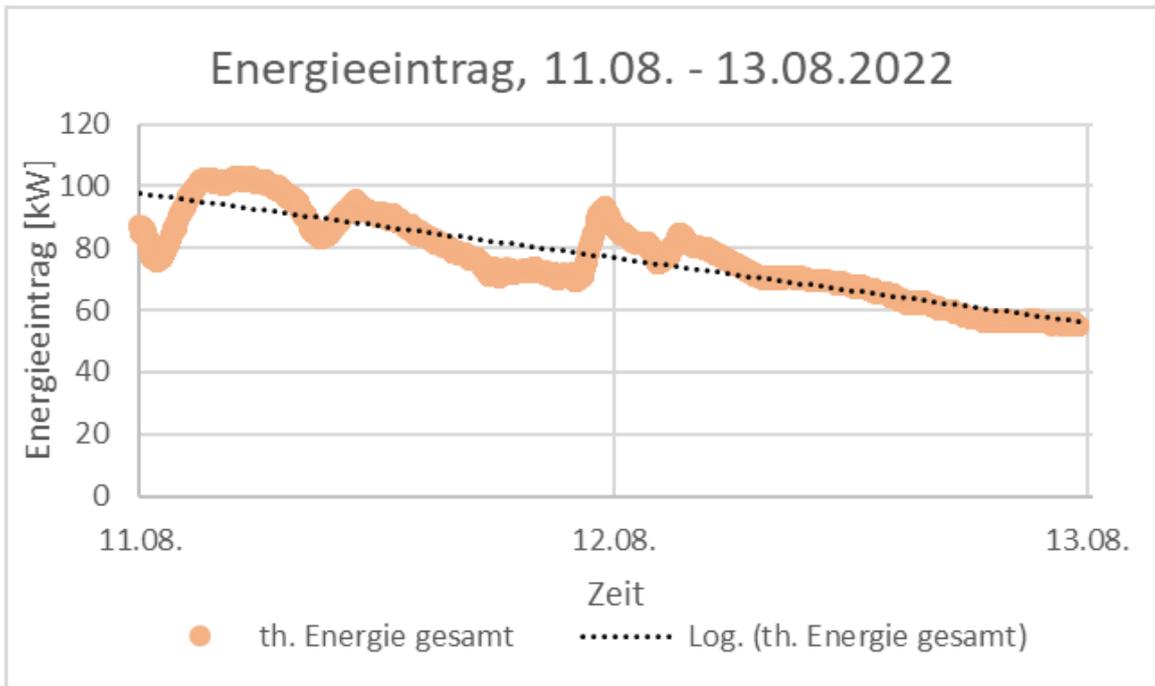


Abbildung 16b Wärmeenergieeintrag in den Klärschlamm-trockner im Zeitraum vom 11.08. - 13.08.2022

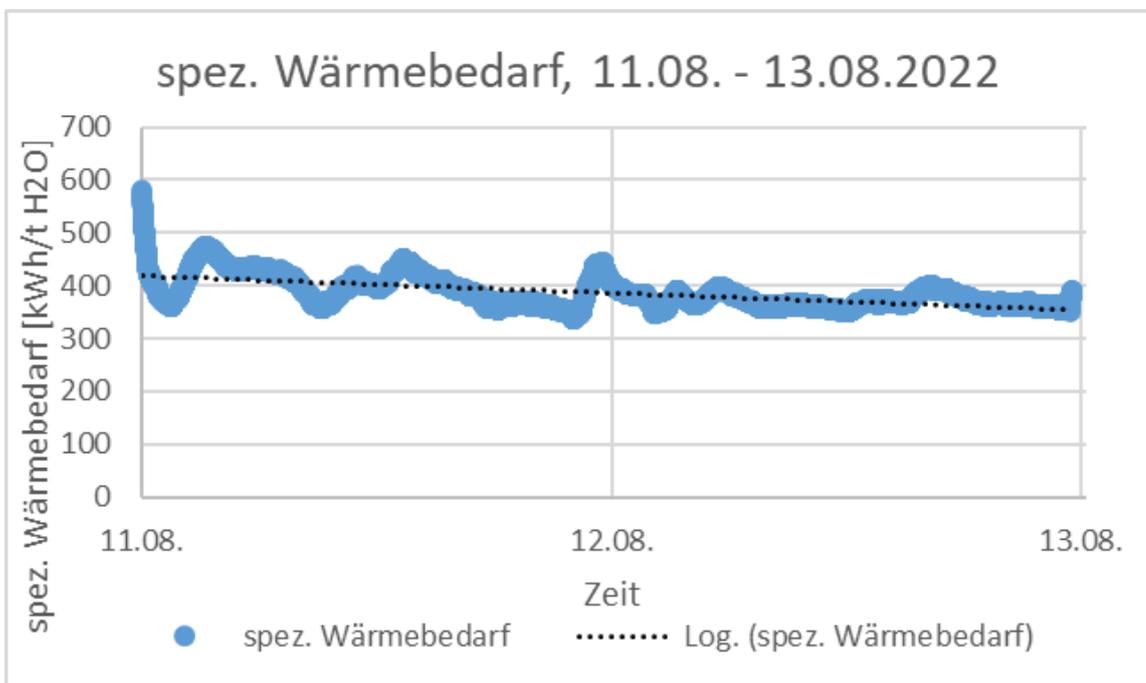


Abbildung 16c Spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm-trockners im Zeitraum vom 11.08. - 13.08.2022

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

Die für die PYREG®-Anlage seit 2021 erarbeiteten und im Anhang 4 dargestellten Daten weisen darauf hin, dass bis ca. 0,8 kW Wärme pro kg karbonisierter TM ausgekoppelt werden können. 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 kann.

Dies würde bedeuten, dass mit der Anlage im Volllastbetrieb maximal ca. 70 kWh/h Abwärme zurückgewonnen werden können. Bei Leitungsverlusten von ca. 12 % stehen für die Trocknung folglich ca. 60 kWh/h an Abwärme aus der PYREG®-Anlage 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 PYREG®-Anlage und spezifischer Wärmebedarf des Klärschlamm trockners) müssen nach Umbau und Anpassung des Wärmesystems nochmals überprüft und verifiziert werden.

2.6.3. Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeit der neuen Klärschlammbehandlungsanlage 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.

Kosten der Klärschlammbehandlung vor Umbau, Stand 2014

In Anhang 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 verwertet werden kann. Im Anhang 8b wird unterstellt, dass der entwässerte Klärschlamm künftig in die Verbrennung gebracht werden muss.

Im Anhang 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 wird.

Im Anhang 9a wurde dabei unterstellt, dass das Karbonisat an die Düngemittelindustrie abgegeben werden kann und der Kläranlage dafür keine Kosten entstehen, mit dem Karbonisat aber auch keine Erlöse erzielt werden können. Zum Zeitpunkt des Projektstarts 2014 wurde von den Projektpartnern angenommen, dass zumindest dieser Fall realisiert werden könnte, bestenfalls wären sogar geringe Erlöse für das Karbonisat zu erwirtschaften.

Im Anhang 9b und 9c werden zu Vergleichszwecken ergänzend die Kosten ausgewiesen, die 2014 ermittelt worden wären, wenn von der Entsorgung 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 von Anhang 8a/b und 9a/b/c sind in Tabelle 4 wiedergegeben.

Tabelle 4: Ergebnis der Wirtschaftlichkeitsprognosen verschiedener Varianten der Behandlung des ausgefaulten Klärschlamm der KLA Linz-Unkel

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

Im Anhang 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 in der Landwirtschaft verwertet, der Rest in der Verbrennung entsorgt. Ein Teil des Faulschlammes musste 2018 außerdem, aufgrund der unzureichenden Betriebsstabilität der PYREG®-Anlage und da die Speicherkapazität der Kläranlage erschöpft war, durch einen Lohnentwässerer entwässert werden. Dieser Anteil an entwässertem Faulschlamm wurde ebenfalls direkt landwirtschaftlich verwertet.

2021 wurde die gesamte auf der KLA Linz-Unkel anfallende Schlammmenge auf der Anlage entwässert, getrocknet und karbonisiert. Das Karbonisat musste verbrannt

werden.

Tabelle 5 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 verwertet werden darf bzw. in der Verbrennung entsorgt werden muss (siehe hierzu auch Anhang 9b und 9c). Sie liegen deutlich darüber. Der genauere Vergleich (Anhang 9b/9c mit Anhang 10a und 10b) zeigt, dass insbesondere die Wartungs- und Instandhaltungskosten zu Buche schlagen, die deutlich über den erwarteten Werten liegen, sowie der Gasverbrauch, der höher ist als es erwartet wurde.

Tabelle 5: Vergleich der Wirtschaftlichkeitsprognosen von 2014 für die neue Klärschlammbehandlungsanlage mit den 2018 und 2021 ermittelten Kosten

Soll				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 Düngemittel- industrie	Verwertung in der Landwirtschaft	Entsorgung in die Verbrennung	Entsorgung in der Verbrennung und in die Landwirtschaft, außerdem: Verwertung einer kleineren Menge von entwässertem Faulschlamm in der Landwirtschaft	Entsorgung in der Verbrennung
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 Klärschlammasche bezeichneten Verfahrensrückstandes und des entstehenden Düngemittels

Laut Zuwendungsbescheid sollte die Zusammensetzung und Qualität, insbesondere die Pflanzenverfügbarkeit und Schwermetallgehalte der Klärschlammasche (hier, aufgrund der thermischen Behandlung des Klärschlammes im PYREG®-Reaktor, korrekt: des

Klärschlammkarbonisats) beurteilt werden. Dazu gehören alle relevanten Parameter nach Düngemittelverordnung (DüMV) und Klärschlammverordnung (AbfKlärV), Urangehalt, der P-Gehalt des Karbonisats sowie die Ammoniumcitratlöslichkeit des Phosphors. Die Häufigkeit sollte monatlich sein.

Im Anhang 11 sind die Ergebnisse der Untersuchungen des Karbonisats nach DüMV und AbfKlärV zusammengefasst. In allen untersuchten Proben wurden die einzuhaltenden Grenzwerte unterschritten.

Der Uranwert im Karbonisat liegt bei den vorliegenden Untersuchungen zwischen 3,8 mg/kg und 6,8 mg/kg 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. Gleiches gilt für den Cadmiumgehalt, der sowohl unter dem Grenzwert der Abfallklärschlammverordnung, wie auch der Düngemittelverordnung liegt.

Die Analysen zeigen außerdem, dass nur Spuren von Quecksilber (Hg) im Karbonisat enthalten sind.

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 PYREG®-Anlage 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 Tripelsuperphosphat (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) dienten 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-ammoniumcitratlöslich, im KSK 700 waren es nur 42,6 % (Analysen: LUFA, Kiel).

Tabelle 6 gibt die chemische Kenngrößen der Phosphordünger wieder.

Tabelle 6: 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	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

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 7 entnommen werden.

Tabelle 7: 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 CaCl_2 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 Weidelgrasaufwuchs 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 laktatlösliches Phosphor (CAL-P) untersucht.

In der Kontrollvariante, also ohne P-Düngung, kümmerte der Mais und bildete fast keinen Ertrag (Abbildung 17a). 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). Die Phosphoraufnahme des Mais zeigte im Prinzip die gleiche Differenzierung wie die Erträge (Abbildung 17b).

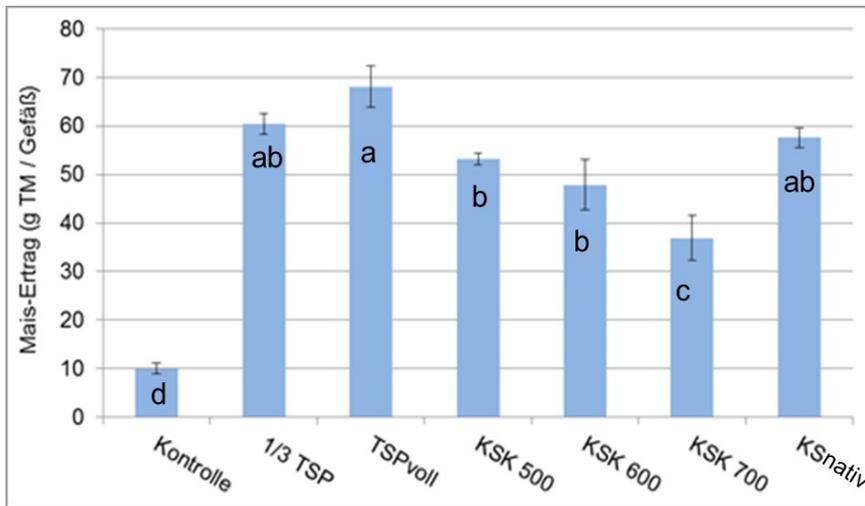


Abbildung 17a: Ertrag an Mais im Gefäßversuch
in Abhängigkeit von der Düngung (\pm Standardfehler)

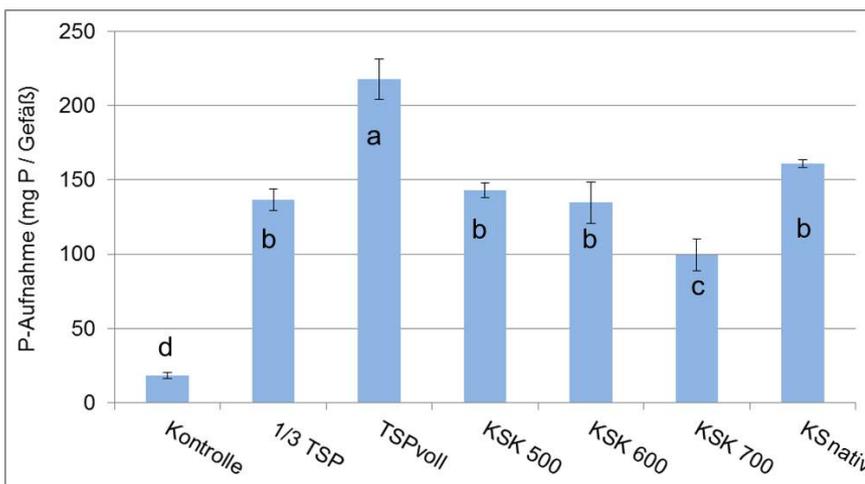


Abbildung 17b: P-Aufnahme des Maises im Gefäßversuch
in Abhängigkeit von der Düngung (\pm Standardfehler)

In den Versuchen mit dem nachgebauten Weidelgras zeigte sich die Depotwirkung von nativem Klärschlamm und Karbonisaten. Abbildung 18a und 18b zeigt 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 noch Phosphor an das Weidelgras, als der durch die 1/3 TSP-Düngung den Pflanzen zur Verfügung gestellte Phosphor bereits knapp wurde.

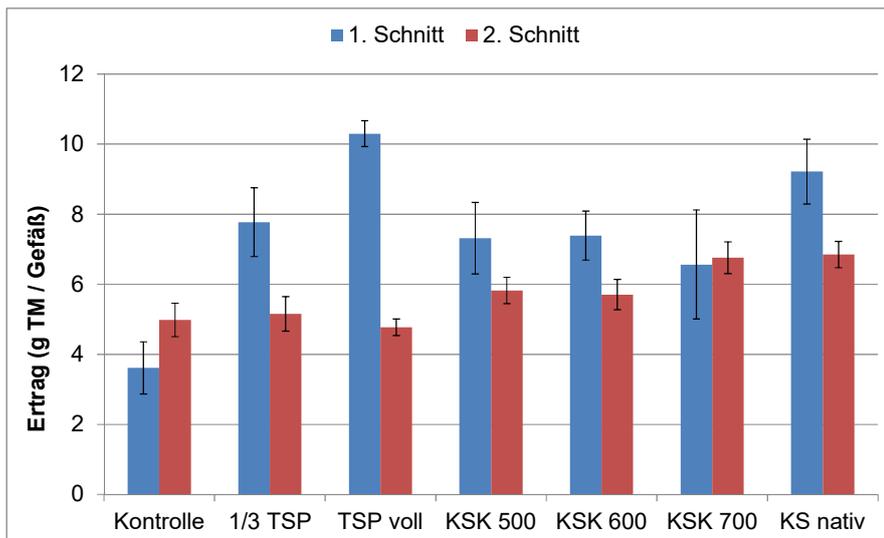


Abbildung 18a: Ertrag an Weidelgras im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung (\pm Standardfehler)

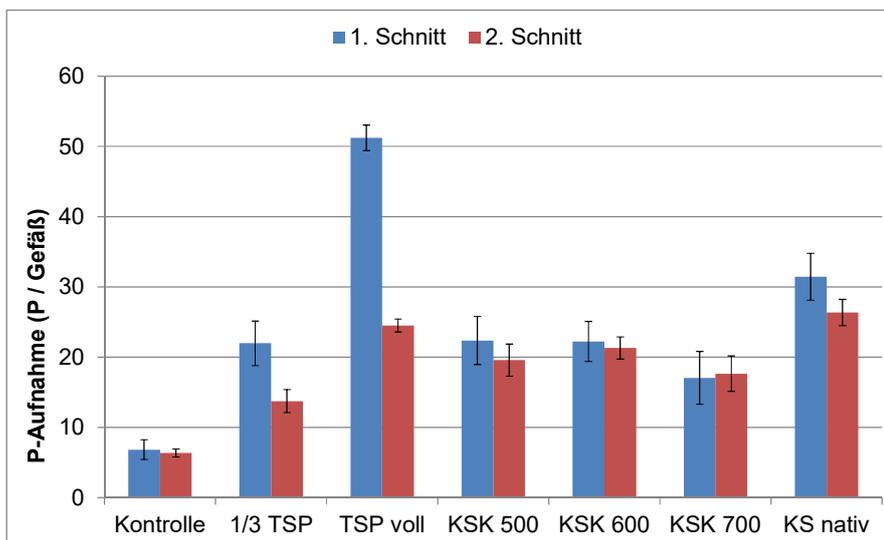


Abbildung 18b: P-Aufnahme des Weidelgrases im Gefäßversuch in Abhängigkeit von der Düngung (\pm Standardfehler)

Das P-Nachlieferungspotenzial der Recyclingdünger Karbonisat und nativer Klärschlamm lässt sich auch am laktatlöslichen P im Boden ablesen (Abbildung 19a und 19 b). 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 Tripelsuperphosphats (Abbildung 17 und 18). Möglicherweise überschätzte die CAL-Methode die Düngewirkung des nativen Klärschlammes. Nimmt

man die P-Aufnahme der Pflanzen als Maßstab für die Düngewirkung der P-Dünger (Abbildung 17b und 18b), dann entspricht die Düngewirkung des KSK 500 für den Mais etwa der Wirkung von 1/3 TSP. Nimmt man aber stattdessen den CAL-P im Boden als Maßstab für die Düngewirkung (Abbildung 19a und 19b), dann zeigt KSK 500 eine bessere Wirkung als 1/3 TSP, denn CAL-P im Boden ist 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 ist die Disparität noch größer. Der Phosphor aus den Karbonisaten erscheint also in relativ größerem Maß als laktatlöslicher P im Boden, als er von den Pflanzen (Mais und Weidelgras) aufgenommen werden konnte.

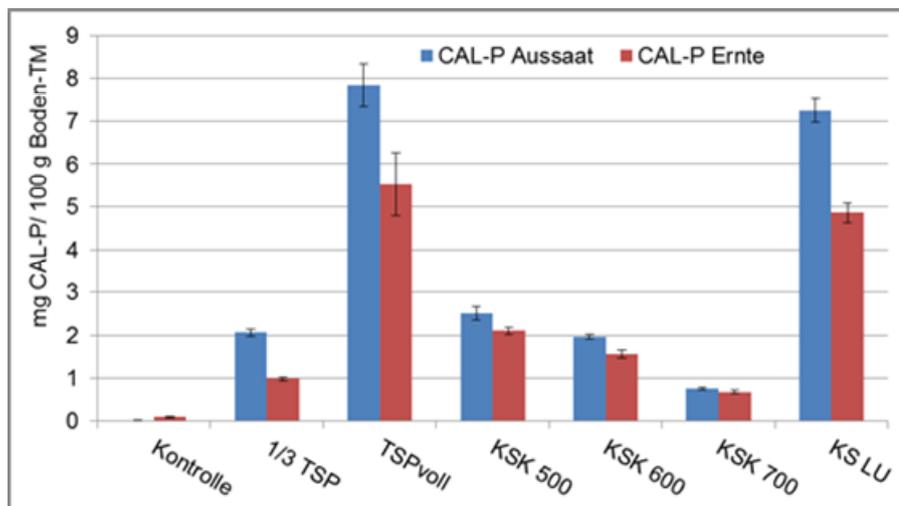


Abbildung 19a: Laktatlöslicher Phosphor im Boden vor und nach dem Anbau von Mais

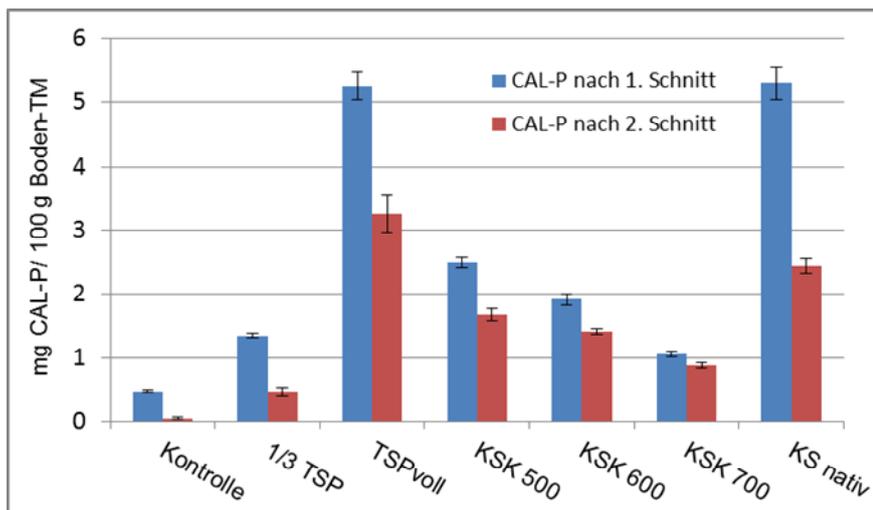


Abbildung 19b: Laktatlöslicher Phosphor im Boden nach dem ersten und zweiten Schnitt des Weidelgrases

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 dem PYREG®-Reaktor im industriellen Maßstab bei 500 bzw. 600 °C hergestellten Karbonisate erreichten eine Düngewirkung, die etwa einem Drittel der Wirkung des wasserlöslichen Tripelsuperphosphats entsprach.

Die Klärschlammkarbonisate erfüllen damit die wichtigste Voraussetzung für einen Dünger, nämlich düngewirksam zu sein. Das tun sie besser als beispielsweise Klärschlammmasche, 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. Ökonomisch kann das Karbonisieren und die landbauliche Verwertung der Karbonisate sinnvoll sein, weil der Klärschlamm durch die Karbonisierung kostengünstig einer sinnvollen Anwendung zugeführt wird und nicht teuer entsorgt werden muss.

2.6.5. Nachweis der Asche- und P-Verwertung

Laut Zuwendungsbescheid sollten detaillierte Angaben über die Ascheverwertung (hier, aufgrund der thermischen Behandlung des Klärschlammes im PYREG®-Reaktor, korrekt: der Klärschlammkarbonisatverwertung) und P-Verwertung, d.h. detaillierte Nachweise über den Verbleib des Karbonisats, erbracht werden. Wird dieses an einen Düngemittelhersteller abgegeben, müssen Nachweise darüber erbracht werden, wie das Karbonisat bei der Düngemittelherstellung verwertet wird. 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 in die Verbrennung entsorgt mit Ausnahme der Mengen, die vor Ende 2019 erzeugt wurden.

Diese Karbonisat wurde an den Düngemittelhersteller sePura GmbH abgegeben. SePura stufte das Material (total ca. 326 t OS), das neben Karbonisat auch lediglich getrockneten Klärschlamm aus An- und Abfahrprozessen enthielt, auf der Basis der Abfallklärschlammverordnung als „Klärschlamm“ ein und nutzte es für die Weiterverarbeitung zu Klärschlammkomposten (organisch-mineralischen Düngemitteln). Die gesamte, an sePura abgegebene Menge wurde zu Klärschlammkomposten verarbeitet; Abfälle aus der Verarbeitung fielen nicht an.

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

- der im Karbonisat enthaltene pflanzenverfügbare Phosphor
- der im Karbonisat enthaltene geringe Stickstoffanteil, 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 sePura, die Lagerstabilität von Düngemittel-Erzeugnisse erhöhen
- die Körnung des Karbonisats, die den organisch-mineralischen Dünger besser streufähig macht und damit die Dosiergenauigkeit verbessert

Die Genehmigungsbehörde (SGD Nord) teilte die Einstufung von Klärschlammkarbonisat auf Basis der Abfallklärschlammverordnung (AbfKlärV) als „Klärschlamm“ allerdings nicht.

Mit der Änderungsgenehmigung vom 30.02.2020 (Anhang 5) hat die SGD Nord das auf der KA 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 Karbonisate.

Aus diesem Grund kann das Karbonisat auch auf Basis der Düngemittelverordnung derzeit nicht für die Herstellung von Düngemittel eingesetzt werden und ist bis zur Schaffung der rechtlichen Voraussetzung für die Nutzung gemäß DüMV - bestenfalls der Schaffung eines eigenständigen Düngemitteltyps - „einer ordnungsgemäßen Entsorgung zuzuführen“. Als ordnungsgemäße Entsorgung wurde die thermische Beseitigung in einer Verbrennungsanlage genehmigt. Aus diesem Grunde wurde das auf der KLA Linz-Unkel nach 2019 erzeugte Karbonisat in der Verbrennung entsorgt.

Das düngemittelrechtliche Zulassungsverfahren von aus Karbonisaten erzeugten Düngemitteln wurde von dem Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel bereits 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 allerdings bis heute nicht erfolgt. Noch 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 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 können. Klärschlammaschen aus der Verbrennung, die eine deutlich geringere Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Phosphors aufweisen als Karbonisat, sind als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Düngemitteln in der Düngemittelverordnung zugelassen. Aus diesem Grund sind die Bedenken des WBD für den Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel nicht nachvollziehbar.

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 solle. Dies würde eine wirtschaftlichere Alternative gegenüber der Entsorgung in der Verbrennung darstellen und sollte genutzt werden, bis die rechtlichen Voraussetzungen für die Verwendung von Klärschlammkarbonisat als Düngemittel geschaffen sind. Mit Bescheid vom 21.07.2022 teilte die SGD Nord mit, dass es hierfür einer Genehmigung nach § 16 BImSchG bedürfe.

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, ist die erste Anlage dieser Art zur kontinuierlichen Karbonisierung von kommunalem Klärschlamm, die in Deutschland errichtet wurde. Sie hat somit Pilot- und Modellcharakter; mit möglichen Schwierigkeiten bei der Umsetzung war zu rechnen.

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

- mit einer Schneckenpresse zur Klärschlammmentwässerung
- mit einem EloDry® Niedertemperatur-Bandrockner zur Klärschlamm-trocknung und

- mit einer PYREG® 500 Anlage zur Klärschlammkarbonisierung

Im Projektverlauf wurden Nachbesserungen erforderlich, sie sind detailliert in Pos. 2.3. beschrieben.

Wesentliche, erfolgreich umgesetzte technische Nachbesserungsmaßnahmen waren vor allem:

- der Ersatz der ursprünglich installierten Schneckenpresse durch ein leistungsfähigeres, größeres Aggregat.
Damit kann die Klärschlammmentwässerung 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 Trocknerablufte.
Damit werden die von der Genehmigungsbehörde geforderten Emissionsgrenzwerte der Trocknerablufte sicher eingehalten.
- Die Nachrüstung eines Staubfilters als zusätzliche Stufe zur Abgasbehandlung der PYREG®-Anlage.
Damit können die von der Genehmigungsbehörde geforderten Emissionsgrenzwerte im Abgas der PYREG®-Anlage eingehalten werden.

Daneben wurden insbesondere technische Optimierungsmaßnahmen zur Erhöhung des Durchsatzes und der Betriebsstabilität der PYREG®-Anlage durchgeführt sowie Maßnahmen zur Optimierung der Wärmeversorgung des Trockners.

Der aktuelle Stand stellt sich heute wie folgt dar:

- Die Schlammmentwässerung erfüllt die Anforderungen der Planung.
- Der Schlammrockner inklusive Abluftbehandlung erfüllt die Anforderungen der Planung. Der spezifische Wärmebedarf für die Trocknung ist besser als er bei der Planung zugrunde gelegt wurde, allerdings kann der exakte Wert aufgrund der aktuell noch bestehenden Schwierigkeiten bei der Wärmeversorgung derzeit immer noch nicht genau bestimmt werden.
- Die PYREG®-Anlage 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 PYREG®-Anlage der KLA Linz-Unkel kann nicht ausreichend betriebsstabil betrieben werden. Es kommt immer noch zu häufigen Anlagenstillständen und zu Zeiten mit reduzierter Durchsatzleistung, mit der Folge, dass nicht der gesamte

anfallende, getrocknete Klärschlamm sicher karbonisiert werden kann.

Die Gründe hierfür werden von Anlagenbetreiber und Hersteller der PYREG®-Anlage unterschiedlich gesehen.

- Die Nutzung der Wärme der PYREG®-Anlage und von anderen, auf der KLA installierten Aggregaten, insbesondere der Mikrogasturbine, ist mit dem vorhandenen System nicht optimal möglich. Nachbesserungsmaßnahmen können hier Abhilfe schaffen oder zumindest zu einer wesentlichen Verbesserung führen. Sie wurden bislang aber nicht umgesetzt.

Bei der technischen Umsetzung des Vorhabens wurden folgende Schwierigkeiten unterschätzt:

- Die Probleme, die sich an der PYREG®-Anlage inklusive der Abgasbehandlung im Dauerbetrieb zeigten, waren größer und die Lösung zeitaufwändiger als erwartet.
- 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.
- Die Klärschlammkarbonisierung ist ein Verfahren, das dem KLA-Personal unbekannt ist. Der Aufwand für die Ausbildung des Personals wurde 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 PYREG®-Anlage für die KLA Linz-Unkel im Jahr 2014 wurde vom Land Rheinland-Pfalz eine Einstufung des Karbonisats als mineralischer Dünger (Phosphorhaltige Klärschlammasche) in Aussicht gestellt. Diese war jedoch 2015, bei Inbetriebnahme der Anlage, nicht erfolgt.

Parallel hierzu hat das Umweltministerium des Saarlands 2015 eine Einstufung des Karbonisats aus der PYREG®-Anlage 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 PYREG®-Anlagen 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 und dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) am 25.04.2018 in Bonn wurde der PYREG signalisiert, dass man auf die geplanten Änderungen in der EU-Düngemittelverordnung warte und somit keine zeitnahe Umsetzung des Verfahrens in Aussicht stellen könne, obwohl die Rückfragen des WBD ausreichend aufgeklärt worden seien.

Aus diesem Grunde wurde ein alternativer Weg beschritten um den Einsatz von PYREG®-Karbonisaten aus kommunalem Klärschlamm als Düngemittel rechtssicher zu ermöglichen: 2018 erfolgte die Registrierung als mineralisches Düngemittel in Schweden (Registrierungsbestätigung der schwedische Chemikalienbehörde KEMI vom 27.09.2018, Anhang 13). Das Material darf 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 neuen EU-Verordnung 2019/515 sollte das Karbonisat damit außerdem auch in Deutschland als Düngemittel in Verkehr gebracht werden dürfen. Entsprechend der neuen EU-Verordnung 2019/515 kann der Hersteller/Inverkehrbringer eine Selbsterklärung verfassen, es bedarf keiner weiteren Zulassung einer deutschen Behörde. Für ein Inverkehrbringen als Düngemittel in Deutschland im Rahmen des Verfahrens der „gegenseitigen Anerkennung“ müssten PYREG® Karbonisate allerdings zusätzlich zu den in Deutschland gültigen Grenzwerten auch die in Schweden gültigen einhalten. Dies bedeutet für PYREG®-Karbonisate, dass auch der in Schweden geltende Grenzwert für Cadmium eingehalten werden muss, der strenger ist als in Deutschland.

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.

Auch die neueste 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 aus PYREG®-Anlagen rechtssicher als Düngemittel in Deutschland zu etablieren, erfolglos. Eine Prognose, ob und - vor allem - wann dies künftig erreicht werden kann, ist nicht seriös 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 können. Aus diesem Grund wurden an der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel noch notwendige projektbezogene Optimierungsmaßnahmen im Laufe der Zeit auch zunehmend zögerlicher in Angriff genommen.

Letztlich betrachtet es der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel heute als einen Fehler, ein Vorhaben durchzuführen, bei dem die entscheidende rechtliche Frage vorab nicht eindeutig geklärt war.

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 derzeit, bei stabilem Betrieb der PYREG®-Anlage, bestenfalls realisieren lassen.

Wie in Pos.2.3.A., Anlagendurchsatz, beschrieben, kann die PYREG®-Anlage 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 PYREG®-Anlage 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 für ca. 2 Tage nach der wöchentlichen Anlagenwartung, danach geht die Leistung der PYREG®-Anlage kontinuierlich zurück.

In Pos. 2.3.B., 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 Wärmemengemengen und -ströme wieder, wie sie sich derzeit, bei stabilem Volllastbetrieb der PYREG®-Anlage (Durchsatz: 90 kg TM/h) ergeben. Die größte Unsicherheit besteht hierbei bezüglich des im Anhang dargestellten Wärmebedarf 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 8 sind die wichtigsten Anlagenkenngößen laut Planung den bislang tatsächlich erreichten Werten gegenübergestellt.

Tabelle 8: Vergleich der wichtigsten Anlagenkenngößen (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	√
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 % 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. Tabelle 9 gibt das Ergebnis von vergleichenden Untersuchungen von Inhaltsstoffen im getrockneten Klärschlamm und im trockenen Klärschlammkarbonisat wieder, die von der PYREG GmbH durchgeführt wurden.

Tab. 9 Massenbilanz und Vergleich der Inhaltstoffe von Klärschlamm(KS) und Klärschlammkarbonisat (K) und Bezug auf den P-Gehalt (Daten vom 19.10.2018, PYREG GmbH)

		KS	K	Massenbilanz K/KS	Massenbilanz K/KS zu P2O5
Phosphat als P2O5	%	6,75	15	222%	100%
Eisen (Fe)	mg/kg	46000	117000	254%	114%
Blei (Pb)	mg/kg	52,9	108	204%	92%
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,88	0,99	113%	51%
Chrom (Cr)	mg/kg	34	62,5	184%	83%
Kupfer (Cu)	mg/kg	319	464	145%	65%
Nickel (Ni)	mg/kg	28	56,3	201%	90%
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,62	0,05	8%	4%
Zink (Zn)	mg/kg	1350	2650	196%	88%
Arsen (As)	mg/kg	3,23	4,37	135%	61%



Die Daten zeigen, dass sich die untersuchten Schwermetalle im Karbonisat größtenteils, aufgrund der Massenreduktion um ca. 50 % während der Karbonisierung, auf etwa das Doppelte anreichern. Hingegen wird Quecksilber zu über 95% sowie Cadmium und Arsen um ca. 50% aus dem Feststoff eliminiert. 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).

Die pyrogene CO₂-Abscheidung und -Speicherung (engl. *pyrogenic carbon capture and storage*, daher abgekürzt PyCCS) ist eine Form der CO₂-Abscheidung und -Speicherung, bei der Verfahren zur Pyrolyse von Biomasse („Verkohlung“) angewandt werden. PyCCS 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. Die durch pyrolytische Prozesse eingelagerte Kohle wird Biokohle (engl.: „Biochar“) genannt.

Bei der Karbonisierung von Klärschlamm werden im Gegensatz zur Verbrennung von Klärschlamm erhebliche Mengen CO₂ in das Karbonisat eingelagert und so für Jahrtausende dem Kreislauf entzogen (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 der wieder in den Boden kommt. Die Berechnung berücksichtigt keinen Verbrauch an Strom und Gasv sowie keine Transportemissionen und ähnliches.

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

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: $C = 12, CO_2 = 12 \times 2 \times 16 = 44 / 12 = 3,667$

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 PYREG®-Verfahrens zur Klärschlammbehandlung in Linz-Unkel.

Dabei wurde von folgenden Annahmen ausgegangen:

- Der entwässerte Schlamm wird der Verbrennung in Bottrop zugeführt, wie dies für Schlamm der KLA Linz-Unkel derzeit der Fall ist.
- Die geplante Jahresmenge an Klärschlamm-Trockenmasse (563,4 t/a, siehe Pos. 2.2.) wird vollständig karbonisiert.
- Das Karbonisat kann in einem Umkreis von 50 km an Verbraucher (Landwirte) abgegeben werden.

Tabelle 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*	kgCO ₂ /tSchlamm/km	0,103	0,103
CO ₂ -Emissionen	kgCO ₂ /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 landbauliche Verwertung des Klärschlammes ist aufgrund der Änderung der gesetzlichen Grundlagen erschwert bzw. unmöglich geworden. Hierzu trägt auch die mangelnde Flächenverfügbarkeit für eine Klärschlammaufbringung und eine Verkürzung der Aufbringungszeiten bei.

Aus diesen Gründen kommt auch für kleinere Kläranlagen wie die KLA Linz-Unkel mittel- bis langfristig nur die Entsorgung des Klärschlammes in der Verbrennung in Frage.

Bei Projektstart 2014 mussten 115,00 €/t Klärschlamm mit 25 - 27 % TR für die Entsorgung des Klärschlammes in der Verbrennung 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) wurde in Pos. 2.6.3. bereits den prognostizierten Werten gegenübergestellt.

Es liegen insbesondere die Kosten für die Wartung und Instandhaltung sowie die für den Gasverbrauch deutlich über den prognostizierten Werten. Die hohen Wartungs- und Instandhaltungskosten werden vorrangig durch die PYREG®-Anlage verursacht. Hier fließen auch die Kosten für die regelmäßig wiederkehrenden, von behördlicher Seite geforderten Emissionsmessungen ein, die mit ca. 30.000 €/a zu Buche schlagen. 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 unterliegen. Allerdings wurden zwischenzeitlich anlagentechnische Modifikationen durchgeführt (insbesondere: Anpassung der Wendelstärke, Wechsel des

Materials), die zur Annahme berechtigen, 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 in die Verbrennung entsorgt worden wäre.

Das direkte Verbringen des entwässerten Klärschlammes in die Verbrennung wäre für die KLA unter diesen Voraussetzungen wesentlich wirtschaftlicher gewesen als die zusätzliche Trocknung und Karbonisierung. Erst bei einem Entsorgungspreis pro t Klärschlamm von 195.- Euro wären bei beiden Vorgehen Kosten in vergleichbarer Höhe (ca. 245.- €/t entwässertem Klärschlamm bzw. ca. 946.- €/t TM) angefallen.

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

- die Optimierung des Wärmenetzes
- die Verbesserung der Betriebsstabilität der PYREG®-Anlage
- die Möglichkeit der Verwertung des Karbonisats als Düngemittel

Unter den Voraussetzungen der Vorgaben im Anhang 14 wären die Kosten bei beiden Vorgehen für einen Entsorgungspreis von ca. 120 €/t Klärschlamm in der Verbrennung vergleichbar, wenn die Wartungs- und Instandhaltungskosten der Klärschlamm trocknungs- und Klärschlamm karbonisierungs-Anlage auf ca. 2/3 reduziert werden und das Karbonisat kostenlos an die Düngemittelindustrie abgegeben werden könnte.

3.5. Technischer Vergleich zu konventionellen Verfahren

Beim PYREG®-Verfahren wird entwässertes und getrockneter Klärschlamm thermisch behandelt. Es ähnelt am ehesten einer Klärschlamm-Monoverbrennung. Die wesentlichen Merkmale beider Verfahren sind in Tabelle 12 vergleichend gegenübergestellt.

Tabelle 12: Gegenüberstellung wesentlicher Merkmale von PYREG®-Verfahren und KS-Verbrennung

	PYREG®-Verfahren	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 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
	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. 600 °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/a	max. 7500	i.d.R. mind. 8200

Output-Material		
	Karbonisat mit ca. 20 % elementarem Kohlenstoff	Asche (Primärasche: Rost-, Kessel- und/oder Zyklonasche)
	Abfall-Asche und Schlacke aus der Abgasreinigung Kontaminierte Aktivkohle Waschwasser	Abfall-Asche (Sekundärasche: Flugasche aus der Abgasreinigung)
Düngewirkung von Karbonisat bzw. Asche	P ₂ O ₅ Anteil im Karbonisat pflanzenverfügbar	P ₂ O ₅ Anteil in der Asche nicht pflanzenverfügbar
Rechtliche Einstufung lt. DüMV von Karbonisat bzw. Asche	Karbonisat ist nicht als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Düngemitteln zugelassen	Asche ist als Ausgangsmaterial für die Herstellung von Düngemitteln zugelassen

PYREG®-Verfahren:

Für den stabilen Betrieb einer PYREG®-Anlage muss der getrocknete Schlamm einen Trockenstoffgehalt von mindestens 85 %, besser 90 % aufweisen. Die thermische Behandlung erfolgt bei maximal ca. 600 °C und 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 beim PYREG®-Verfahren ein Klärschlammkarbonisat. Das Klärschlammkarbonisat enthält ca. 20 % an elementarem Kohlenstoff und pflanzenverfügbaren Phosphor. Das Karbonisat ist bislang in der DüMV nicht als Ausgangsmaterial für die Düngemittelherstellung in zugelassen.

Die erste auf dem Markt erhältliche PYREG®-Anlage - d.h. die Anlage, die auf der KLA Linz-Unkel installierte wurde - 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 die in etwa die 3-fache Menge an Klärschlamm (ca. 2.300 t an getrocknetem Klärschlamm pro Jahr) durchsetzen können.

PYREG®-Anlagen 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, 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“.

Klärschlamm-Monoverbrennung:

Für den stabilen Betrieb einer Klärschlamm-Verbrennung ist lediglich teilgetrockneter 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 (§6, (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 (§5 (1), 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 Verbrennung von Klärschlamm bleibt Klärschlammmasche zurück, der darin erhaltene Phosphor ist nicht pflanzenverfügbar. Es sind aufwändige chemische Prozesse notwendig um den in der Asche enthaltenen Phosphor pflanzenverfügbar zu machen.

Asche aus Klärschlamm nach AbfKlärV, die für eine Aufbringung nach AbfKlärV zulässig sind (DüMV, Anlage 2, 7.3.16) , sind als Ausgangsmaterial für die Herstellung von organisch-mineralischen Düngemitteln (DüMV, Anlage 1, Abschnitt 3) zugelassen,

Klärschlamm-Monoverbrennungsanlagen 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.

PYREG®-Anlagen stellen heute grundsätzlich einen dezentralen Lösungsansatz für die Klärschlamm Entsorgung bzw. -verwertung für Kläranlagen von ca. 50.000 bis ca. 150.000 EW (= 750 t TM/a bis ca. 2300 t TM/a) dar. Voraussetzung hierfür ist aber, dass das Karbonisat als Ausgangsstoff für die Herstellung eines Düngemittels in die DüMV aufgenommen wird und die Anlage technisch so weit optimiert wird, dass das Verfahren eine mit der Entsorgung des Schlammes in der Verbrennung vergleichbare Betriebssicherheit und Wirtschaftlichkeit aufweist. Beide Voraussetzungen sind für die PYREG®-Anlage der KLA Linz-Unkel noch nicht erfüllt.

4. Übertragbarkeit

4.1. Erfahrungen aus der Praxiseinführung

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

- Die installierte PYREG®-Anlage kann nicht mit 112,7 k TM/h, sondern maximal mit ca. 90 kg TM/h betrieben werden. Dieses Defizit lässt 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).
- Die Wärmerückgewinnung aus der Karbonisierung beträgt nicht 200 kWh/h wie geplant, sondern maximal ca. 60 kWh/h. Dieses Defizit lässt sich nur durch den Einsatz von Wärme alternativer Wärmequellen ausgleichen. Diese Erkenntnis muss bei der Planung weiterer PYREG®-Anlagen zur Klärschlammkarbonisierung berücksichtigt werden.

Zum anderen traten beim Betrieb der Anlage diversen Störungen und „Kinderkrankheiten“ auf, die bis wenige Ausnahmen behoben wurden:

- Nicht behoben wurde bislang die dringend notwendige technische Optimierung der Wärmeschiene der KLA Linz-Unkel, die sicherstellen soll, dass die auf der Anlage verfügbare Wärme den Verbrauchern auch tatsächlich und optimal zur Verfügung gestellt wird (Details hierzu können Pos. 2.3, Umsetzung des Verfahrens, B. Wärmeversorgung, entnommen werden).
- Nicht behoben sind auch die Schwierigkeiten, die PYREG®-Anlage stabil und betriebssicher über mindestens 4 – 5 d/w bei Vollast (ca. 90 kg TM/h) zu betreiben.

Unterschätzt wurde der Zeitaufwand

- für die Einweisung und Schulung des Betriebspersonals in die neue - ungewohnte - Anlagentechnik und insbesondere auch
- 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 Anlage werden vergleichbare künftige Projekte zudem mit der nachfolgenden Änderung an der PYREG®-Anlage umgesetzt, die für die KLA Linz-Unkel allerdings nicht mit vertretbarem finanziellem Aufwand realisiert werden kann:

- Zur Sicherstellung des für das Abgas der PYREG®-Anlage geforderten Staubemissionsgrenzwerts wurde die PYREG®-Anlage der KLA Linz-Unkel nachträglich mit einem Staubfilter als letzter Stufe der Abgasreinigung nachgerüstet. Künftige PYREG®-Anlagen sollen zur Sicherstellung des für das Abgas der PYREG®-Anlage geforderten Staubemissionsgrenzwerts mit einem Keramikfilter ausgerüstet werden, 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 Karbonisierungsprozesse zurückgewonnene Wärme, aus.

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

Ohne die Möglichkeit der Nutzung des Karbonisats als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff, ist die Installation einer PYREG®-Anlage zur Behandlung von Klärschlamm auf einer kommunalen Kläranlage aber letztlich keine Option zur Entsorgung des Klärschlammes in der Verbrennung:

Das Ziel, mit einer Klärschlamm-trocknungs- und Klärschlammkarbonisierungsanlage die zukunftsorientierte, entsorgungssichere und wirtschaftliche Klärschlamm-entsorgung

sicherzustellen, ist ohne die Möglichkeit, das Karbonisat als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff verwerten zu können, nicht zu erreichen.

4.2. Modellcharakter/Übertragbarkeit (Verbreitung und weitere Anwendung des Verfahrens/der Anlage/des Produkts)

Die Ergebnisse, die mit der neuen Klärschlammbehandlungsanlage der KLA Linz-Unkel erzielt wurden, insbesondere die der Klärschlammkarbonisierung mit der PYREG®-Anlage, können auf andere Kläranlagen mit mindestens der gleichen Größe wie Linz-Unkel und darüber hinaus, d.h. Kläranlagen mit ca. 50.000 EW und bis ca. 150.000 EW, übertragen werden; die Anlage der KLA Linz-Unkel hat hierfür Modellcharakter.

Das auf der KLA Linz-Unkel realisierte Vorhaben hat gezeigt, dass ein Klärschlammbehandlungskonzept basierend auf dem PYREG®-Verfahren, nach derzeitigem Kenntnisstand, nur dann wirtschaftlich auf einer kleineren 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 PYREG®-Anlage technisch optimiert werden muss: Die Effizienz der Anlage muss gesteigert und die Betriebssicherheit bzw. die Bedienerfreundlichkeit deutlich erhöht werden. Dem hat die PYREG GmbH bei weiteren Installationen auf kommunalen Kläranlagen bereits versucht Rechnung zu tragen.

Entscheidend für die Nutzung der PYREG®-Technologie für die Klärschlammbehandlung, d.h. für die Akzeptanz im Markt, ist aber letztlich der rechtliche Status des PYREG®-Karbonisats und die Möglichkeit der uneingeschränkten, diskussionslosen Nutzung als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff.

Der Betrieb der Klärschlamm-trocknung und -karbonisierung auf der KLA Linz-wurde Ende 2023 aus den folgenden Gründen zumindest vorläufig 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 durch die PYREG®-Anlage 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 Heizkessel zur Verfügung gestellt werden. Der Heizkessel benötigt zum Betrieb aber Erdgas. Der Anstieg des Erdgaspreises in der jüngeren Vergangenheit lässt es aus

Gründen der Wirtschaftlichkeit ratsam erscheinen, diese Möglichkeit nur in Notfällen – 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 aber 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 Unsinn.

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 PYREG[®]-Verfahren dar.

Beim PYREG[®]-Verfahren werden Mikroplastik und Spurenstoffe - ähnlich wie bei der Klärschlammverbrennung - sicher aus dem Klärschlamm eliminiert, der Schlamm wird zudem von Quecksilber (Hg), Cadmium (Cd) und Arsen (As) entfrachtet (100 % Elimination von Hg, ca. 50 % Elimination von Cd und Arsen). Im Gegensatz zu Klärschlammmasche aus einer Klärschlamm-Monoverbrennung enthält PYREG[®]-Karbonisat aber - neben noch etwa

20 % elementaren Kohlenstoff - pflanzenverfügbaren Phosphor. PYREG®-Karbonisat könnte damit grundsätzlich direkt als hochwertiger Düngemittelrohstoff verwertet werden.

Der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel hat sich zur Installation einer PYREG®-Anlage 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 Mono-Klärschlammverbrennungsanlagen.

Die PYREG®-Anlage der KLA Linz-Unkel war die erste Anlage dieser Art, die in Deutschland installiert wurde. Sie stellte damit eine Pilotanlage 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 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 einwandfreie, allgemein anerkannte Möglichkeit, das anfallende Karbonisat direkt als Düngemittel oder Düngemittelrohstoff zu vermarkten; es muss – immer noch – in einer Verbrennungsanlage entsorgt werden.

Da der Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel deswegen 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) hat man Ende 2023 entschieden, den Betrieb der Anlage zumindest vorläufig einzustellen, mögliche weitere Optimierungen zu unterlassen und den - lediglich entwässerten - Klärschlamm bis auf Weiteres direkt in eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage abzugeben.

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 utilisation
- 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 the PYREG® process, microplastics and trace substances are – similar to sewage sludge incineration - safely eliminated from den sewage sludge and the sludge is also freed of mercury (Hg), cadmium (Cd) and Arsenic (As) (100 % elimination of Hg, approx.. 50 % elimination of Cd and As). In contrast to sewage sludge ash from sludge incineration, PYREG® carbonisate also contains plant-available phosphorus, in addition to about 20 % elementary Carbon.

The „Zweckverband Abwasserbeseitigung Linz-Unkel“ decided to install a PYREG® plant 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 mono-incineration plants.

The PYREG® plant at the wwtp Linz-Unkel was the first plant of its kind to be installed in Germany. It was therefore a pilot plant with a 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 at the end of 2023 to at least temporarily 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.

6. Literatur

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)

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

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

