

Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az **33960/01-32**Referat **32**Fördersumme **348,493**
€

Antragstitel On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage

Stichworte Biologische P-Rückgewinnung

Laufzeit

3 Jahre

Projektbeginn

01.02.2018

Projektende

31.03.2021

Projektphase(n)

Zwischenberichte

31.07.2019

Bewilligungsempfänger

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH –
UFZ, Department Umweltmikrobiologie
04318 Leipzig

Tel

++49 (0)341 235 1330

Fax

++49 (0)341 235 1351

Projektleitung

Dr. Susanne Günther

Bearbeiter

Dr. Susanne Günther

Kooperationspartner

Abwasserzweckverband „Mittlere Mulde“
Maxim-Gorki-Platz 1, 04838 Eilenburg

CENTEC, Gesellschaft für Labor- und Prozessmesstechnik mbH
63477 Frankfurt-Maintal

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Phosphor (P) ist eine nicht-erneuerbare Ressource, die weltweit knapp wird. Sein Einsatz erfolgt hauptsächlich in der Landwirtschaft als Dünger. Je nach Modell reichen die P-Reserven noch 50-330 Jahre. Die Qualität des geförderten Phosphors sinkt zunehmend, da der Anteil von Uran, Cadmium und anderen Schwermetallen zunimmt. Deshalb ist es das Ziel des Projektes, eine Pilotanlage zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem Klärschlamm einer Kläranlage aufzubauen, und ihren Betrieb zu optimieren. Dabei sollen Hefen aus Endführungen einer Brauerei als Phosphatakkumulierer eingesetzt werden. Die mit Phosphor angereicherten, schadstoffarmen Hefen können als biologischer Phosphatdünger und zur Verbesserung der Bodenqualität eingesetzt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Für eine Rückgewinnung des Phosphates aus der Kläranlage muss eine Pilotanlage, bestehend aus 2 Einheiten, aufgebaut werden. Beide Einheiten bestehen aus IPC-Tanks mit 1 m³ Volumen. Der erste Tank enthält ein Rührwerk und dient der Rücklösung von Phosphor aus Schlämmen und Prozesswässern. Der rückgelöste Phosphor wird dann mit der zellarmen Flüssigkeit in den Tank 2 transportiert, wo eine Belüftungseinheit dafür sorgt, dass die zugesetzten Hefen den Phosphor aus der wässrigen Lösung aufnehmen. Nach Beendigung des Aufnahmeprozesses wird die Hefe geerntet und hinsichtlich ihrer Eignung als Dünger untersucht. Der Aufbau der Pilotanlage und deren initiale Tests waren Bestandteil von Arbeitspaket (AP) 1 und 2. Die Hochskalierung und Untersuchung des Rückgewinnungsprozesses war Bestandteil von AP 3 - 5. Die Optimierung des Betriebes mittels Tests verschiedener Schlämme und Prozesswässer stand in den APs 7 - 11 im Vordergrund. P-Bilanzen (AP13) sollten sowohl zur Auswahl P-reicher Schlämme befähigen, den Einfluss von Fällungsmitteln auf den stabilen Betrieb der Anlage (AP 12) verfolgen und beurteilen, ob sich Strukturen und Funktionen von mikrobiellen Gemeinschaften in den verschiedenen Becken und Reaktoren der Abwasseranlage sich verändern (AP 14). Das entstandene Produkt wurde in den APs 15 und 16 untersucht. Parallel zu den Versuchen an der Pilotanlage sollten ein Dichte- und ein Ultraschallsensor der Firma Centec den Phosphorgehalt im Medium und den Hefezellen überwachen (AP6).

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☐ An der Bornau 2 ☐ 49090 Osnabrück ☐ Tel 0541/9633-0 ☐ Fax 0541/9633-190 ☐ <http://www.dbu.de>

Ergebnisse und Diskussion

Im Projektverlauf wurde die Pilotanlage zur P-Rückgewinnung geplant und aufgebaut. Das Betreiben der Pilotanlage zeigte, dass diese in wesentlichen Parametern funktioniert und alle Grundvoraussetzungen für einen erfolgreichen Betrieb vorliegen. Anfängliche Probleme wie die starke Schaumentwicklung und Hefeverluste bei der Ernte konnten gelöst werden. Nach umfangreichen Untersuchungen zu (i) den P-Bilanzen in den Becken und Reaktoren der Abwasseranlage, zu (ii) dem Einfluss von Phosphor-Fällungsmitteln auf die P-Bilanz und zu (iii) den Veränderungen von Strukturen und Funktionen der 16 beteiligten mikrobiellen Gemeinschaften nach Änderung des Regimes bezüglich Phosphor-Fällung und Zeit (1,5 Jahre Datenerhebung zur P-Bilanz) wurden Überschuss- bzw. Rücklaufschlamm, Trübwasser, Faulschlamm und Klärschlamm als vielversprechende Substrate für die P-Rückgewinnung ausgewählt (Vucic et al. 2021a). Bis auf den Überschuss- und Klärschlamm liegt bei allen Substraten der Anteil des gelöst vorliegenden Phosphors über der ökonomisch wichtigen Konzentrationsgrenze von $0,05 \text{ kg P/m}^3$ (Vucic et al. 2021a). Aus dem Überschuss- und Klärschlamm kann eine entsprechend hohe Konzentration an Phosphor freigesetzt werden.

Die vorhandenen Konzentrationen an gelöstem Phosphor in Tank 1 des Moduls waren generell ausreichend für eine Rückgewinnung mittels Brauhefen. Die höchsten Werte an rückgelöstem Phosphor aus Überschussschlamm, Faulschlamm, Klärschlamm, Trübwasser lagen bei jeweils $0,086$, $0,219$, $0,068$ und $0,061 \text{ kg free P/m}^3$. Der Wert des gelöst vorliegenden Phosphors innerhalb eines Versuchsdurchganges von 4 h kann um bis zu 75% des anfänglichen Wertes reduziert werden. Die durchschnittliche Effizienz in der Reduktion liegt bei 53.85%. Die Aufnahme in Hefen ist bei Trübwasser und Überschussschlamm deutlich besser (54-75%) als bei Faulschlamm und Extrakt aus Klärschlamm (34-60%). Damit können durch einen entweder dauerhaften bzw. mehrfachen Einsatz des Moduls oder ein up-scaling der Anlage die Vorgaben der Klärschlammverordnung von $P < 20 \text{ g/kg TM}$ für den Klärschlamm eingehalten werden (AbfKlärV, 2017). Der in den Hefen akkumulierte Phosphor wurde bezüglich seiner Eignung als Düngemittel untersucht und ist besonders auf Verwitterungsboden gut Pflanzen-verfügbar, wie der Vergleich des Hefedüngers mit einem mineralischen Dünger zeigt. Bis auf die Keimzahl sind die Ergebnisse der Hefevarianten denen des mineralischen Düngers ebenbürtig bzw. liegen in den Nährstoffgehalten teils deutlich darüber. Die Qualitätsuntersuchungen ergaben ebenfalls ein positives Bild. In keiner der getesteten Proben konnten Salmonellen oder Schadstoffe in signifikanter Konzentration nachgewiesen werden. Die Arzneimittel Ciprofloxacin, Levofloxacin, Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac, Cefuroxim, Sulfamethoxazol, Metoprolol und Bezafibrat wurden ebenfalls in den Substraten und dem Produkt untersucht. Sowohl die Substrate, als auch die Produkte (Faulschlamm, Klärschlamm und Überschussschlamm) zeigen sehr geringe Konzentrationen von Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol. In den geernteten Hefen konnte nur bei einem Produkt aus Klärschlamm Ciprofloxacin und Metoprolol nachgewiesen werden. Die von der Centec GmbH zur Verfügung gestellten Sensoren (Dichte und Ultraschallsensor) wurden in einem Bypass am Tank 2 installiert und haben die Versuche in Tank 2 soweit möglich begleitet. Dabei zeigte sich, dass besonders die Bestimmung des free P sehr nah an den mit einer chemischen Methode bestimmten Werten liegt (Abweichung $0,002$ - $0,004 \text{ kg/m}^3$). Auch das bound P kann gut dargestellt werden, jedoch mit einer höheren Abweichung zu den chemisch gemessenen Werten (Abweichung $0,006$ - $0,037 \text{ kg/m}^3$). Eine Reduzierung des Eintrages von Luftblasen kann zu einer weiteren Erhöhung der Bestimmungsgenauigkeit beitragen und die Einsetzbarkeit auch an anderen Stellen der Kläranlage, die bisher von chemischen Messsystemen überwacht werden (Zulauf, Ablauf) erlauben.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen des Projektes wurde eine Veröffentlichung in der Zeitschrift Science of the Total Environment publiziert (Vucic et al. 2021a). Zwei weitere Publikationen wurden zum Thema Allgemeine – P Rückgewinnungsmethoden (Günther et al., 2018) und Biologische P Rückgewinnungsmethoden (Vucic und Müller, 2021b) in der Zeitschrift Engineering in Life Sciences veröffentlicht. Die Daten der Pilotanlage sind ein Teil einer weiteren, in Vorbereitung befindlichen Veröffentlichung. Zudem wurden 4 Artikel in regionalen Zeitschriften veröffentlicht (2x Leipziger Volkszeitung, 1x Dresdner Morgenpost, 1x Tag24). Die Artikel in der Zeitschrift Science of the Total Environment und in Engineering in Life Sciences sowie die Links zu den regionalen Zeitschriften sind dem Abschlussbericht beigelegt.

Fazit

Eine Rückgewinnung von gelöstem Phosphor unter Einsatz von Resthefen aus der Brauerei ist aus wissenschaftlicher Sicht machbar. Jedoch bedarf es ingenieurstechnischer Weiterentwicklungen im Bereich des up-scalings der Prozessführung sowie der Produkternte, um den Rückgewinnungsprozess weniger arbeitsaufwendig und zunehmend rentabel zu gestalten. Schwerpunkt der weiteren Entwicklung sollte eine semi-kontinuierliche Rückgewinnung gekoppelt mit einer schonenden und schnellen Trocknung des Produktes sein.

Abschlussbericht

On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage

Aktenzeichen 33960/01-32



Projektlaufzeit:	01.02.2018 – 31.03.2021
Projektleiter:	Dr. Susanne Günther Arbeitsgruppe Flow Cytometry Arbeitsgruppenleitung: Prof. Dr. Susann Müller Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ
Verfasser:	Dr. Susanne Günther
Datum:	31.03.2021

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az **33960/01-32** Referat **32** Fördersumme **348,493 €**

Antragstitel **On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage**

Stichworte

Laufzeit 3 Jahre	Projektbeginn 01.02.2018	Projektende 31.03.2021	Projektphase(n)
Zwischenberichte	31.07.2019		
Bewilligungsempfänger	Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH – UFZ, Department Umweltmikrobiologie 04318 Leipzig	Tel	++49 (0)341 235 1330
		Fax	++49 (0)341 235 1351
		Projektleitung Dr. Susanne Günther	
		Bearbeiter Dr. Susanne Günther	
Kooperationspartner	Abwasserzweckverband „Mittlere Mulde“ Maxim-Gorki-Platz 1, 04838 Eilenburg		
	CENTEC, Gesellschaft für Labor- und Prozessmesstechnik mbH 63477 Frankfurt-Maintal		

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Phosphor (P) ist eine nicht-erneuerbare Ressource, die weltweit knapp wird. Sein Einsatz erfolgt hauptsächlich in der Landwirtschaft als Dünger. Je nach Modell reichen die P-Reserven noch 50-330 Jahre. Die Qualität des geförderten Phosphors sinkt zunehmend, da der Anteil von Uran, Cadmium und anderen Schwermetallen zunimmt. Deshalb ist es das Ziel des Projektes, eine Pilotanlage zur Rückgewinnung von Phosphor aus dem Klärschlamm einer Kläranlage aufzubauen, und ihren Betrieb zu optimieren. Dabei sollen Hefen aus Endführungen einer Brauerei als Phosphatakkumulierer eingesetzt werden. Die mit Phosphor angereicherten, schadstoffarmen Hefen können als biologischer Phosphatdünger und zur Verbesserung der Bodenqualität eingesetzt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Für eine Rückgewinnung des Phosphates aus der Kläranlage muss eine Pilotanlage, bestehend aus 2 Einheiten, aufgebaut werden. Beide Einheiten bestehen aus IPC-Tanks mit 1 m³ Volumen. Der erste Tank enthält ein Rührwerk und dient der Rücklösung von Phosphor aus Schlämmen und Prozesswässern. Der rückgelöste Phosphor wird dann mit der zellarmen Flüssigkeit in den Tank 2 transportiert, wo eine Belüftungseinheit dafür sorgt, dass die zugesetzten Hefen den Phosphor aus der wässrigen Lösung aufnehmen. Nach Beendigung des Aufnahmeprozesses wird die Hefe geerntet und hinsichtlich ihrer Eignung als Dünger untersucht. Der Aufbau der Pilotanlage und deren initiale Tests waren Bestandteil von Arbeitspaket (AP) 1 und 2. Die Hochskalierung und Untersuchung des Rückgewinnungsprozesses war Bestandteil von AP 3 - 5. Die Optimierung des Betriebes mittels Tests verschiedener Schlämme und Prozesswässer stand in den APs 7 - 11 im Vordergrund. P-Bilanzen (AP13) sollten sowohl zur Auswahl P-reicher Schlämme befähigen, den Einfluss von Fällungsmitteln auf den stabilen Betrieb der Anlage (AP 12) verfolgen und beurteilen, ob sich Strukturen und Funktionen von mikrobiellen Gemeinschaften in den verschiedenen Becken und Reaktoren der Abwasseranlage sich verändern (AP 14). Das entstandene Produkt wurde in den APs 15 und 16 untersucht. Parallel zu den Versuchen an der Pilotanlage sollten ein Dichte- und ein Ultraschallsensor der Firma Centec den Phosphorgehalt im Medium und den Hefezellen überwachen (AP6).

Ergebnisse und Diskussion

Im Projektverlauf wurde die Pilotanlage zur P-Rückgewinnung geplant und aufgebaut. Das Betreiben der Pilotanlage zeigte, dass diese in wesentlichen Parametern funktioniert und alle Grundvoraussetzungen für einen erfolgreichen Betrieb vorliegen. Anfängliche Probleme wie die starke Schaumentwicklung und Hefeverluste bei der Ernte konnten gelöst werden. Nach umfangreichen Untersuchungen zu (i) den P-Bilanzen in den Becken und Reaktoren der Abwasseranlage, zu (ii) dem Einfluss von Phosphor-Fällungsmitteln auf die P-Bilanz und zu (iii) den Veränderungen von Strukturen und Funktionen der 16 beteiligten mikrobiellen Gemeinschaften nach Änderung des Regimes bezüglich Phosphor-Fällung und Zeit (1,5 Jahre Datenerhebung zur P-Bilanz) wurden Überschuss- bzw. Rücklaufschlamm, Trübwasser, Faulschlamm und Klärschlamm als vielversprechende Substrate für die P-Rückgewinnung ausgewählt (Vucic et al. 2021a). Bis auf den Überschuss- und Klärschlamm liegt bei allen Substraten der Anteil des gelöst vorliegenden Phosphors über der ökonomisch wichtigen Konzentrationsgrenze von $0,05 \text{ kg P/m}^3$ (Vucic et al. 2021a). Aus dem Überschuss- und Klärschlamm kann eine entsprechend hohe Konzentration an Phosphor freigesetzt werden. Die vorhandenen Konzentrationen an gelöstem Phosphor in Tank 1 des Moduls waren generell ausreichend für eine Rückgewinnung mittels Brauhefen. Die höchsten Werte an rückgelöstem Phosphor aus Überschussschlamm, Faulschlamm, Klärschlamm, Trübwasser lagen bei jeweils $0,086$, $0,219$, $0,068$ und $0,061 \text{ kg free P/m}^3$. Der Wert des gelöst vorliegenden Phosphors innerhalb eines Versuchsdurchganges von 4 h kann um bis zu 75% des anfänglichen Wertes reduziert werden. Die durchschnittliche Effizienz in der Reduktion liegt bei $53,85\%$. Die Aufnahme in Hefen ist bei Trübwasser und Überschussschlamm deutlich besser ($54\text{--}75\%$) als bei Faulschlamm und Extrakt aus Klärschlamm ($34\text{--}60\%$). Damit können durch einen entweder dauerhaften bzw. mehrfachen Einsatz des Moduls oder ein up-scaling der Anlage die Vorgaben der Klärschlammverordnung von $P < 20 \text{ g/kg TM}$ für den Klärschlamm eingehalten werden (AbfKlärV, 2017). Der in den Hefen akkumulierte Phosphor wurde bezüglich seiner Eignung als Düngemittel untersucht und ist besonders auf Verwitterungsboden gut Pflanzen-verfügbar, wie der Vergleich des Hefedüngers mit einem mineralischen Dünger zeigt. Bis auf die Keimzahl sind die Ergebnisse der Hefevarianten denen des mineralischen Düngers ebenbürtig bzw. liegen in den Nährstoffgehalten teils deutlich darüber. Die Qualitätsuntersuchungen ergaben ebenfalls ein positives Bild. In keiner der getesteten Proben konnten Salmonellen oder Schadstoffe in signifikanter Konzentration nachgewiesen werden. Die Arzneimittel Ciprofloxacin, Levofloxacin, Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac, Cefuroxim, Sulfamethoxazol, Metoprolol und Bezafibrat wurden ebenfalls in den Substraten und dem Produkt untersucht. Sowohl die Substrate, als auch die Produkte (Faulschlamm, Klärschlamm und Überschussschlamm) zeigen sehr geringe Konzentrationen von Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol. In den geernteten Hefen konnte nur bei einem Produkt aus Klärschlamm Ciprofloxacin und Metoprolol nachgewiesen werden. Die von der Centec GmbH zur Verfügung gestellten Sensoren (Dichte und Ultraschallsensor) wurden in einem Bypass am Tank 2 installiert und haben die Versuche in Tank 2 soweit möglich begleitet. Dabei zeigte sich, dass besonders die Bestimmung des free P sehr nah an den mit einer chemischen Methode bestimmten Werten liegt (Abweichung $0,002\text{--}0,004 \text{ kg/m}^3$). Auch das bound P kann gut dargestellt werden, jedoch mit einer höheren Abweichung zu den chemisch gemessenen Werten (Abweichung $0,006\text{--}0,037 \text{ kg/m}^3$). Eine Reduzierung des Eintrages von Luftblasen kann zu einer weiteren Erhöhung der Bestimmungsgenauigkeit beitragen und die Einsetzbarkeit auch an anderen Stellen der Kläranlage, die bisher von chemischen Messsystemen überwacht werden (Zulauf, Ablauf) erlauben.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Rahmen des Projektes wurde eine Veröffentlichung in der Zeitschrift Science of the Total Environment publiziert (Vucic et al. 2021a). Zwei weitere Publikationen wurden zum Thema Allgemeine – P Rückgewinnungsmethoden (Günther et al., 2018) und Biologische P Rückgewinnungsmethoden (Vucic und Müller, 2021b) in der Zeitschrift Engineering in Life Sciences veröffentlicht. Die Daten der Pilotanlage sind ein Teil einer weiteren, in Vorbereitung befindlichen Veröffentlichung. Zudem wurden 4 Artikel in regionalen Zeitschriften veröffentlicht (2x Leipziger Volkszeitung, 1x Dresdner Morgenpost, 1x Tag24). Die Artikel in der

Zeitschrift Science of the Total Environment und in Engineering in Life Sciences sowie die Links zu den regionalen Zeitschriften sind dem Abschlussbericht beigelegt.

Fazit

Eine Rückgewinnung von gelöstem Phosphor unter Einsatz von Resthefen aus der Brauerei ist aus wissenschaftlicher Sicht machbar. Jedoch bedarf es ingenieurstechnischer Weiterentwicklungen im Bereich des up-scalings der Prozessführung sowie der Produkternte, um den Rückgewinnungsprozess weniger arbeitsaufwendig und zunehmend rentabel zu gestalten. Schwerpunkt der weiteren Entwicklung sollte eine semi-kontinuierliche Rückgewinnung gekoppelt mit einer schonenden und schnellen Trocknung des Produktes sein.

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1. Kurzzusammenfassung	1
2. Anlass und Zielsetzung des Projekts	4
2.1 Phosphor als Rohstoff	4
2.2 Lösungsansatz	5
3. Darstellung der Arbeitsschritte	6
4. Methoden zu den Arbeitspaketen	7
4.1 Arbeitsschritte zur Erstellung der Phosphorbilanz in der Abwasseranlage (AP13-AP14)	7
4.1.1. Beprobung der Kläranlagen Prozessströme für die APs 13 und 14	7
4.1.2. Bestimmung der Trockenmasse (TM) der Prozessströme für die APs 13 und 14	8
4.1.3 Bestimmung von Gesamt-P und freiem P der Prozessströme für die APs 13 und 14	9
4.1.4 Bestimmung der Dichte der Prozessströme für die APs 13 und 14	9
4.1.5 Durchflusszytometrische Messung der Prozessströme für die APs 13 und 14	9
4.1.6 Bioinformatische Analyse der Prozessströme für die APs 13 und 14	10
4.1.7 P-Bilanzen der Prozessströme für die APs 13 und 14	10
4.1.8 Unterscheidung zwischen biologisch und chemisch entferntem P für die APs 13 und 14	12
4.2 Arbeitsschritte zum Aufbau und Testung der Pilotanlage (AP1-AP5)	13
4.2.1 Beprobung der Pilotanlage Tank 1 und Tank 2 (AP1-AP5)	13
4.2.2 Bestimmung von FM und TM in Proben der Pilotanlage (AP1-AP5)	14
4.2.3 Bestimmung von Gesamt-P und freiem P in der Pilotanlage (AP1-AP5)	16
4.2.4 Bioinformatische Analyse der Daten zur Erkennung und Behandlung von Extremwerten	16
4.3 Arbeitsschritte zur Sensorkalibrierung (AP6)	16
5. Resultate	19
5.1. Analyse der Phosphorbilanzen (AP13-AP14)	19
5.2. Stabiler Betrieb der Anlage (AP 12)	21
5.3 Phosphor-Rückgewinnung aus Prozessschlamm und Prozesswässern (AP7-AP11)	25
5.3.1 Modulbetrieb im Tank 1	25
5.3.1.1. Überschussschlamm in Tank 1	26
5.3.1.2 Trübwasser im Tank 1	27
5.3.1.3. Faulschlamm im Tank 1	27
5.3.1.4. Klärschlamm im Tank 1	28
5.3.2. Zusammenfassung der Werte für Tank 1 für die Prozessschlamm und -wässer	30
5.3.3 Modulbetrieb im Tank 2	32
5.3.3.1. Vorbereitung der Hefen für den Einsatz in Tank 2	32
5.3.3.2 Ernte der Hefen nach dem Einsatz in Tank 2	33
5.3.3.3 Reduktion von freiem P und Akkumulation in Hefen aus Prozessschlamm und -wässern in Tank 2	34
5.3.3.3.1 Reduktion von freiem P und Akkumulation in Hefen aus Überschussschlamm	35
5.3.3.3.2 Reduktion von freiem P und Akkumulation in Hefen aus Trübwasser	36
5.3.3.3.3 Reduktion von freiem P und Akkumulation in Hefen aus Faulschlamm	38
5.3.3.3.4 Reduktion von freiem P und Akkumulation in Hefen aus Klärschlamm	39
5.3.4 Zusammenfassung der Werte für Tank 2 für die Prozessschlamm und -wässer	40
5.4 Prozessbegleitende Sensormessungen im Tank 2	48
5.5 Düngemitteltests (AP15)	50
5.6 Qualitätstests/Schadstoffuntersuchungen (AP16)	59
6. Zusammenfassung der Ergebnisse	65
7. Literatur	67

Abbildungsverzeichnis

	Seite
Abbildung 1	P-Verteilung innerhalb der Kläranlage. 1
Abbildung 2	Arbeitsplan mit Arbeitspaketen und Meilensteinen des Projektes. 6
Abbildung 3	Probenahmestellen der Kläranlage. 8
Abbildung 4	Schematischer Aufbau der Pilotanlage. 14
Abbildung 5	Verhältnis von Frisch- zu Trockenmasse in Brauhefechargen 15
Abbildung 6	Phosphorgehalte in FM zu P in TM 16
Abbildung 7	Einfluss der Temperaturkompensation auf Dichte und Schallgeschwindigkeit 18
Abbildung 8	Phosphor-Verteilung innerhalb der Kläranlage 20
Abbildung 9	NMDs-Grafiken mit den Veränderungen in den 16 mikrobiologischen Gemeinschaften über 748 Tage. 22
Abbildung 10	Einfluss der P-Fällung auf die Mikroorganismen. 23
Abbildung 11	Interaktion der Mikroorganismen mit free und bound P. 24
Abbildung 12	Freisetzung von free P aus dem Überschussschlamm (ÜS). 26
Abbildung 13	Freisetzung von free P aus Trübwasser (Trüb). 27
Abbildung 14	Freisetzung von free P aus Faulschlamm (FS). 28
Abbildung 15	Entwässerter Klärschlamm (22.09. 2020) in den Containern. 29
Abbildung 16	Rücklösung von Klärschlämmen (KS) in jeweils 800 l Brauchwasser. 29
Abbildung 17	Fällmitteleinsatz 4. Quartal 2018 im Vergleich zum 4. Quartal 2020. 32
Abbildung 18	Big Bag mit entwässerter Hefe (links), Hefeentnahme für den Einsatz in Tank 2 (Mitte) und aufgeschlämmte Hefe über Filtersieb (rechts). 33
Abbildung 19	Hefeernte durch Abschaben der Hefen nach Entnahme der Belüftungsanlage aus dem Big Bag. 34
Abbildung 20	Supernatants Überschussschlamm (a), Trübwasser (b), Faulschlamm (c) und Klärschlamm (d) in Tank 2. 34
Abbildung 21	Reduktion des free P während 4 h Aufenthalt mit 3,5 h Belüftung in Tank 2 aus dem Substrat Supernatant Überschussschlamm (ÜS). 36
Abbildung 22	Zunahme des bound P in TM Hefe aus dem Substrat Überschussschlamm (ÜS) 36
Abbildung 23	Reduktion des free P während 4 h Aufenthalt mit 3,5 h Belüftung in Tank 2 aus dem Substrat Supernatant Trübwasser (Trüb). 37
Abbildung 24	Zunahme des bound P in TM Hefe bei Einsatz des Substrates Trübwasser (Trüb). 37
Abbildung 25	Reduktion des free P während 4 h Aufenthalt mit 3,5 h Belüftung in Tank 2 aus dem Substrat Supernatant Faulschlamm (FS). 38
Abbildung 26	Zunahme des bound P in TM Hefe bei Einsatz des Substrates Faulschlamm (FS). 38
Abbildung 27	Reduktion des free P während 4 h Aufenthalt mit 3,5 h Belüftung in Tank 2 aus dem Substrat Supernatant Klärschlamm (KS). 39
Abbildung 28	Zunahme des bound P in TM Hefe bei Einsatz des Substrates Klärschlamm (KS). 39
Abbildung 29	Gemessene Schall- und Dichtewerte (rechts) und daraus berechnete Werte für free P und bound P im Vergleich zu den während des Versuchs gemessenen Werten für bound und free P 48
Abbildung 30	Gemessene Schall- und Dichtewerte (rechts) und daraus berechnete Werte für free P und bound P im Vergleich zu den während des Versuchs gemessenen Werten für bound und free P. 49
Abbildung 31	Vergleich der 14 Parameter: Pflanzengröße, FM und TM der Pflanzen, Keimzahl, der Gehalt an P, Mg, N und K sowie Rohasche (RA), Rohfaser (RF), Rohprotein (RP), ELOS (enzymlösliche organische Substanz), aNDFom (Hemicellulose, Cellulose und Lignin), Stärke und Zucker auf V und D Boden in den Anbaujahren 2019 und 2020. 52
Abbildung 32	Beispielrechnung für den Vergleich zwischen Referenzwert (oben) und Prüfwert (unten) 56

Tabellenverzeichnis

	Seite
Tabelle 1	25
Tabelle 2	30
Tabelle 3	31
Tabelle 4	40
Tabelle 5	41
Tabelle 6	43
Tabelle 7	44
Tabelle 8	45
Tabelle 9	46
Tabelle 10	47
Tabelle 11	50
Tabelle 12	57
Tabelle 13	61
Tabelle 14	64

Abkürzungsverzeichnis

aNDFom	in neutralen Detergenzien lösliche Faser abzüglich des Aschegehalts
AP	Arbeitspaket
C	<i>Column</i> (Spalte)
Ca	Calcium
D	Diluvial(boden)
ELOS	Enzymlösliche organische Substanz
Fe	Eisen
FM	Frischmasse
IBC	<i>Intermediate Bulk Container</i>
ICP-OES	<i>Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry</i>
Mg	Magnesium
MS	Meilenstein
MW	Mittelwert
P	Phosphor
RA	Rohasche
RF	Rohfaser
RP	Rohprotein
rel. I.	relative Intensität
rel.	relativ
S	Seite
SC	Subcommunity
STABW	Standardabweichung ($\pm$)
TM	Trockenmasse
U	Uran
V	Verwitterung(sboden)

1. Kurzzusammenfassung

Phosphor ist eine nicht-erneuerbare Ressource, die weltweit knapp wird. Sein Einsatz erfolgt vorwiegend in der Landwirtschaft als Dünger. Je nach Modell reichen die P-Reserven noch 50-330 Jahre. Die Qualität des geförderten Phosphors sinkt zunehmend, da der Anteil von Uran, Cadmium und anderen Schwermetallen zunimmt. Deshalb war es das Ziel des Projektes, eine Pilotanlage zur Rückgewinnung von Phosphor aus Schlämmen einer Kläranlage aufzubauen und ihren Betrieb zu optimieren. Dabei sollen Hefen aus Endführungen einer Brauerei als Phosphatakkumulierer eingesetzt werden.

In den ersten Monaten des Projektes wurde die Pilotanlage zur P-Rückgewinnung auf der Kläranlage in Eilenburg konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen. Die zur Pilotanlage gehörenden Sensoren (Dichte- und Ultraschallsensor; Firma Centec) für die Überwachung von Phosphorgehalt im Medium und den Hefezellen wurden angeschlossen und sind, soweit es die Versuche zugelassen haben, parallel zu den Experimenten gelaufen. In der Anfangsphase des Projektes wurde 16 Becken und Reaktoren der Kläranlage Eilenburg über 748 Tage wöchentlich bis täglich beprobt, um Phosphorbilanzen für in Frage kommende P-reiche Schlämme und Wässer zu erstellen (Abbildung 1), die dann als geeignete Substrate für die P-Rückgewinnung ausgewählt eingesetzt werden sollten. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf das Vorhandensein von gelöst vorliegendem Phosphor gerichtet. Je mehr Fällmittel eingesetzt wurde, desto mehr gelöst vorliegender P wurde durch das Fällmittel gebunden und desto weniger Phosphor wurde biologisch eliminiert und in die Mikroorganismen eingelagert. Im Laufe des Projektes (2018-2021) stieg die eingesetzte Fällmittelmenge auf der Kläranlage Eilenburg teilweise um das Dreifache an, was sich negativ auf die Menge des rücklösaren Phosphors auswirkte.

Nach umfangreichen Untersuchungen zu (i) den P-Bilanzen in den Becken und Reaktoren der Abwasseranlage, zu (ii) dem Einfluss von Phosphor-Fällungsmitteln auf die P-Bilanz und zu (iii) den Veränderungen von Strukturen und Funktionen der 16 beteiligten mikrobiellen Gemeinschaften nach Änderung des Regimes bezüglich Phosphor-Fällung und Zeit (1,5 Jahre Datenerhebung zur P-Bilanz) wurden Überschuss- bzw. Rücklaufschlamm, Trübwasser, Faulschlamm und Klärschlamm als vielversprechende Substrate für die P-Rückgewinnung ausgewählt (Vucic et al. 2021a). Bis auf den Überschuss- und Klärschlamm liegt bei allen Substraten der Anteil des gelöst vorliegenden Phosphors über der ökonomisch wichtigen Konzentrationsgrenze von 0.05 kg P/m^3 (Vucic et al 2021a).

Die Grenze für eine ökonomisch sinnvolle Rückgewinnung wurde von Cornel und Schaum (Cornel und Schaum, 2009) mit $0,05 \text{ kg P/m}^3$ für total P angegeben. In diesem Projekt wird diese Grenze auf gelöste Phosphate (gelöst vorliegender Phosphor: free P) übertragen, da die Hefen nur diesen aus der Lösung aufnehmen können. Zudem sollten insbesondere Schlämme und Wässer behandelt werden, deren P-Gehalt den Wert von 20 g P/kg TM überschreitet. Schlämme und Wässer einer Abwasseranlage, die diesen Wert überschreiten und die Anlage zur Entsorgung verlassen, müssen in Zukunft (Übergangsfrist 12-15 Jahre je nach Anlagengröße) nach Klärschlammverordnung, (AbfKlärV, 2017) bezüglich einer Abreicherung von P verpflichtend behandelt werden.

On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage

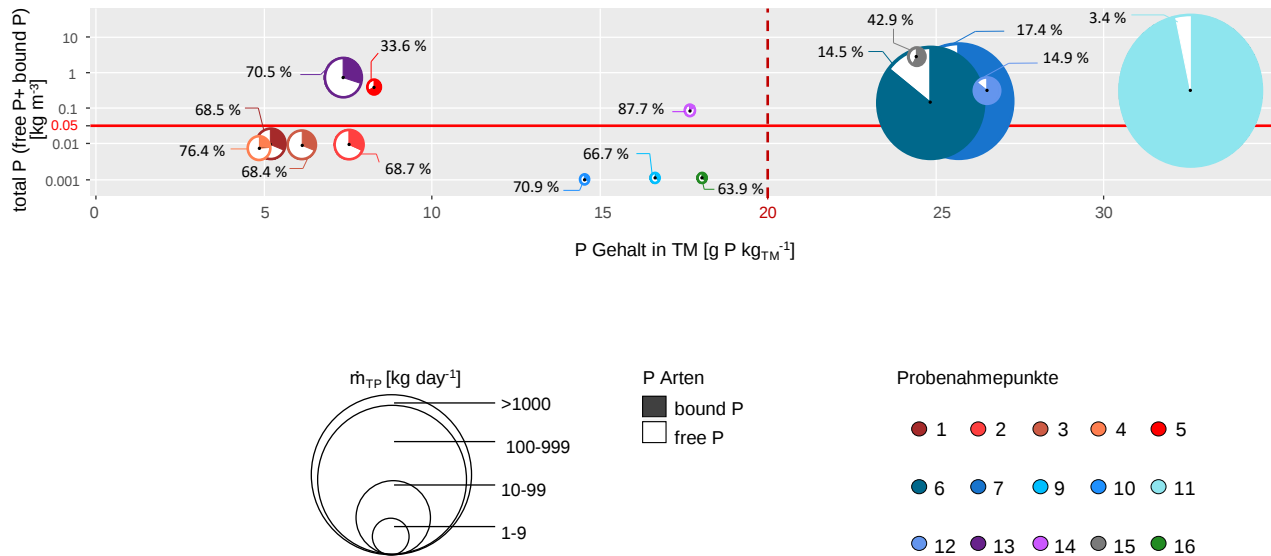


Abbildung 1. P-Verteilung innerhalb der Kläranlage. Alle 15 Probenahmepunkte (der Fällungsschacht, Nr. 8, wurde bei dieser Analyse nicht mit einbezogen) zeigen zusätzlich zum total P-Gehalt und P-Gehalt in Trockenmasse (TM) die Masse an P (Größe des Tortendiagramms) sowie die Verteilung zwischen free and bound P (Tortendiagramm). Der Anteil an free P wird zusätzlich durch eine Prozentangabe hervorgehoben. Die ökonomisch wichtige Grenze von 0,05 kg P/m³ ist als horizontale rote Linie dargestellt, die für die Entsorgung wichtige Grenze von 20 g P/kg TM als vertikale rote Linie. 1 Zulauf, 2 Sandfang (Start), 3. Sandfang (Ende), 4. Vorklärbecken mit Primärschlammabtrennung (5), 6 Belebungsbecken1, 7 Belebungsbecken2, 9 Nachklärbecken1, 10 Nachklärbecken2, 11 Rücklaufschlamm, 12 Überschussschlamm, 13 Faulschlamm, 14 Trübwasser, 15 entwässerter Klärschlamm, 16 Ablauf.

Mit durchschnittlich 1,02 kg P/m³ hat der Klärschlamm den mit Abstand höchsten Gehalt an free P, gefolgt von Faulschlamm 0,51 kg P/m³, Trübwasser mit 0,075 kg P/m³ und vom Überschussschlamm (0,046 kg P/m³, Vucic et al. 2021). Eine weitere Quelle von free P ist der Primärschlamm. Dieser verfügt über rund 0,13 kg P/m³ an free P. Dieses Substrat ist jedoch aufgrund seiner Herkunft (abgesetzte Partikel aus dem Vorklärbecken) und der damit verbundenen Pathogenbelastung für eine Rückgewinnung wenig geeignet. Die Pilotanlage für die Rückgewinnung besteht aus 2 Einheiten. In der ersten Einheit (Tank 1) wird der Phosphor zurück gelöst. In der zweiten Einheit (Tank 2) findet die Aufnahme durch die Hefezellen statt. Für die free P Rücklösung in Tank 1 hat sich eine Inkubationszeit von 2 Stunden für Trübwasser, Faulschlamm und entwässertem Klärschlamm bewährt. Unter stetigem Rühren wird der Phosphor bis über die Grenze von 0,05 kg P/m³ zurückgelöst und wird danach in Tank 2 für eine P-Bindung in Hefen verwendet. Eine längere Aufenthaltszeit im Tank 1 ist nur für den Überschussschlamm notwendig. Hier haben sich 4-48 h als geeignet herausgestellt. Im Modul konnte unter anaeroben Bedingungen in Tank 1 free P rückgelöst werden mit Werten von 7-37 % für Überschussschlamm, mit 7 – 9 % für Klärschlamm, mit 12-33% für Faulschlamm und mit 16-41% für Trübwasser (Tabelle 3).

Nach Erreichen der gewünschten Konzentration von über 0,05 kg P/m³ an free P wurde die Flüssigkeit aus Tank 1 in den Tank 2 geleitet, die Hefen zugegeben und der Rückgewinnungsprozess durch das Starten der Belüftung eingeleitet. Je nach Aktivität der Hefe wurde der entstehende Schaum durch Speiseöl (max. 0,8 l/m³) unter Kontrolle gebracht. Bereits nach den ersten 30 Minuten im Tank 2 wurden durchschnittlich 22% des vorhandenen free P aufgenommen. In den restlichen 3 Stunden sank die Aufnahme auf rund 5% pro 30 min ab. Insgesamt wurden bis zu 75% (Tabelle 6) des free P im Tank 2 in die Hefen aufgenommen. Die Aufnahme in Hefen war bei Trübwasser und Überschussschlamm deutlich besser (54-75%) als bei Faulschlamm und Extrakt aus Klärschlamm (34-60%, Tabelle 6). Für eine schnelle Ernte des Produktes hat es sich als günstig erwiesen, einen Big Bag (Maße 100x100x100 cm) im Tank 2 zu nutzen. Dieser erlaubt

nach der Absetzphase von 20 min die Retention der Hefeflocken während der Leerung des Tanks. So werden bei der 10 minütigen Entleerungsphase bis zu 60% der eingesetzten Hefemenge zurück gehalten. Schwierig sind hier jedoch die Substrate Faulschlamm und Klärschlamm, da durch den hohen Partikelanteil die Poren des Big Bags innerhalb von Sekunden verstopfen. In diesem Fall ist nach der Absetzphase die Entleerung durch Dekantieren des Wassers aus dem Big Bags die beste Lösung. Nach Ernte des Produktes muss dieses getrocknet werden (1-3 h bei 180°C) und kann dann als Dünger verwendet werden. Die Qualität des Düngers wurde durch das Pflanzenbau Referat 72, Nossen, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie an Maispflanzen auf zwei verschiedenen Bodentypen untersucht. Es zeigte sich, dass besonders auf Verwitterungsboden der Hefedünger in den meisten untersuchten Parametern ebenbürtig zu der mineralischen Kontrolle Superphosphat war. Eine Ausnahme bildet hier der Parameter Keimzahl der Maispflanzen, der bei der Hefedüngung deutlich unter der mineralischen Kontrolle lagen. Die Untersuchung der Qualität des Hefedüngers zeigte unbedenkliche Ergebnisse für die Schwermetalle As, Cd, Cr, Cr(IV), Ni, Hg, Tl sowie Salmonellen. In den meisten Proben lagen die Schwermetalle unter der Nachweisgrenze und lediglich die Produkte aus Faul- und Klärschlamm zeigen geringe Schwermetallkonzentrationen weitab von den Grenzwerten und Deklarationswerten der DÜMV. Salmonellen wurden in keiner der untersuchten Proben nachgewiesen. Die Arzneimittel Ciprofloxacin, Levofloxacin, Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac, Cefuroxim, Sulfamethoxazol, Metoprolol und Bezafibrat wurden ebenfalls in den Substraten und dem Produkt untersucht. Sowohl die Substrate, als auch die Produkte (Faulschlamm, Klärschlamm und Überschussschlamm) zeigen sehr geringe Konzentrationen von Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol. In den geernteten Hefen konnte nur bei einem Produkt aus Klärschlamm Ciprofloxacin und Metoprolol in niedrigen Konzentrationen nachgewiesen werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass aus Klärschlamm 7-9% free P rückgelöst werden kann, welches dann im Folgeschritt um bis zu 60% durch die Hefen aufgenommen und damit aus dem Prozess entfernt wird. Bereits vor diesem Schritt kann P aus der Anlage entfernt werden, wenn P aus Überschussschlamm, Faulschlamm oder Trübwasser im Modul zunächst rückgelöst und dann in Hefe aufgenommen wird. Damit können durch einen entweder dauerhaften bzw. mehrfachen Einsatz des Moduls oder ein up-scaling der Anlage die Vorgaben der Klärschlammverordnung von $P < 20 \text{ g/kg TM}$ für den Klärschlamm eingehalten werden (AbfKlärV, 2017).

Verbesserungsbedarf besteht bei dem Prozess der Rückgewinnung in 3 Punkten: (i) der Abtrennung von Partikel aus den Substraten Faulschlamm und Klärschlamm von Tank 1, (ii) semikontinuierliche Betriebsweise von Tank 2 und (iii) Ernte und Produktkonservierung.

Bei den Test zur Sensor gesteuerten Überwachung des Aufnahmeprozesses in Tank 2 zeigte sich, dass die von der Centec GmbH zur Verfügung gestellten Sensoren (Dichte und Ultraschallsensor) besonders bei der Bestimmung des free P (Tank2) sehr nah an den mit einer chemischen Methode bestimmten Werten liegen (Abweichung 0,002-0,004 kg/m^3). Auch das bound P in Hefen (Tank 2) kann gut dargestellt werden, jedoch mit einer höheren Abweichung zu den chemisch gemessenen Werten (Abweichung 0,006-0,037 kg/m^3). Eine Reduzierung des Eintrages von Luftblasen kann zu einer weiteren Erhöhung der Bestimmungsgenauigkeit beitragen. Ein Einsatz dieser chemikalienfreien Methode zur generellen Überwachung von free P sollte auch an anderen Stellen der Kläranlage geprüft werden.

2. Anlass und Zielsetzung des Projekts

2.1 Phosphor als Rohstoff

Phosphor ist ein lebensnotwendiger Rohstoff und essentieller Bestandteil aller Lebewesen. Sein Einsatz erfolgt hauptsächlich in der Landwirtschaft als Dünger. Phosphor ist eine nicht-erneuerbare Ressource, die weltweit knapp wird. Je nach Modell reichen die P-Reserven noch 50-330 Jahre. Die Qualität des geförderten Phosphors wird als zunehmend nachlassend bezeichnet, da der Anteil von Uran, Cadmium und anderen Schwermetallen zunimmt. Dies bewirkt eine Erhöhung der Aufbereitungskosten. Unabhängig davon enthalten Handelsdünger wie Superphosphat bzw. Triple-Superphosphat inzwischen z.B. Spitzenwerte von 172 mg U/kg bzw. 208 mg U/kg Dünger (Dienemann und Utermann, 2012). Diese hohen Zahlen weisen neben der Verknappung der Phosphorressourcen darauf hin, dass dringend Alternativen gefunden werden müssen. Selbst nach der aktuellen Düngemittelverordnung ist die Ausbringung von Düngern mit bis zu 150 mg /kg Blei, 80 mg/kg Nickel und 40 mg/kg Arsen erlaubt (DÜMV, 2019). Mit 248.000 t Phosphatdüngereinsatz in 2019/2020 ist dies eine große Menge an Schadstoffen, die in den Boden gelangt (Inlandsabsatz von Düngemitteln in Deutschland, Statista, 2021). Nach Literaturangaben wäre es möglich, mindestens 40% des Düngedarfs in Deutschland durch P-Rückgewinnung zu decken (Montag et al., 2008). Besonders aussichtsreich ist die Rückgewinnung aus Kläranlagen, da dort Phosphor täglich verfügbar ist ($\sim 2 \text{ g Phosphat}_{\text{ges}}/\text{EW} \cdot \text{d}$, Montag et al, 2008). Die direkte Ausbringung P-reichen Klärschlammes als Dünger in der Landwirtschaft wird jedoch durch die Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 2017) streng geregelt und ist in Zukunft keine Option mehr, insbesondere wegen der hohen Schwermetallbelastung von Klärschlamm, dem Vorhandensein von pathogenen Organismen und zunehmend das Vorhandensein von biologisch aktiven Stoffen wie Antibiotika und endokrinen Substanzen.

Nun ist mit der novellierten Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) die Rückgewinnung des Phosphors aus dem Klärschlamm verbindlich festgeschrieben. Mit einer Übergangsfrist von 12 bzw. 15 Jahren sollen alle Kläranlagen ab der Größenstufe 4b (> 50.000 Einwohnerwerte) zur Rückgewinnung von Phosphor verpflichtet werden, wenn der Gehalt an Phosphor in dem Klärschlamm 20 g P pro kg Trockengewicht übersteigt. Die Rückgewinnung soll hauptsächlich über die Verbrennung in Monoverbrennungsanlagen mit anschließender Deponierung der Asche stattfinden, da bislang geeignete großtechnisch erprobte Methoden zur Rückgewinnung fehlen (BDEW, 2015). Klärschlämme, die mit ihren Phosphorgehalten darunter liegen, dürfen dagegen weiter auf anderem Wege thermisch entsorgt werden (z.B. Mitverbrennung in Zementwerken), wobei hier der Phosphor durch Verdünnung mit anderen Materialien für eine wirtschaftliche Rückgewinnung verloren geht (Umweltbundesamt, 2015). Kritisch wird die Klärschlammverordnung vor allem dahingehend betrachtet, dass im Moment die Kapazitäten der Monoverbrennungsanlagen bei weitem nicht ausreichen würden, um alle in Frage kommenden Klärschlämme behandeln zu können. Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) geht von einer Kapazitätslücke von 1.000.000 t Trockenmasse pro Jahr aus. Da aber die Betreiber der Kläranlagen verpflichtet sind, bis zum 31.12.2023 einen Bericht über geplante bzw. eingeleitete Maßnahmen zur Sicherstellung der Phosphorrückgewinnung vorzulegen, muss nun verstärkt nach Rückgewinnungsverfahren gesucht werden. Diese Verfahren müssen in der Lage sein, den Schlamm entweder soweit an Phosphor abzureichern, dass er auf andere Art thermisch entsorgt werden kann (d.h. einen Phosphor-Anteil im Schlamm von weniger als 20 g pro kg Trockengewicht bzw. eine Reduktion des Gesamtphosphor-Anteils von mindestens 50% erreichen, oder sie müssen Verfahren etablieren, um den Phosphor aus der Asche zurückzugewinnen (siehe auch Günther et al., 2018 und Vucic und Müller, 2021b).

Wenn die Betreiber der Kläranlagen gesetzlich dazu verpflichtet werden den Phosphor zu recyceln, gibt es für sie mehrere Kriterien, die ein potentiell Rückgewinnungsverfahren mitbringen muss: (I) Die Investitionskosten müssen überschaubar sein (selbst wenn die Kosten auf die Abwasserentsorgung aufgeschlagen werden können). (II) Es muss technisch einfach realisierbar und robust sein. (III) Es muss Abnehmer für das Produkt geben. (IV) Die Verfügbarkeit der eingesetzten Betriebsmittel muss langfristig gesichert sein (was z.B. im Fall von Magnesium nicht unbedingt der Fall ist, da dieser Rohstoff neben Phosphatgestein mit auf der Liste der kritischen Rohstoffe für die EU steht (EU, 2020)).

2.2 Lösungsansatz

In diesem Projekt wird beabsichtigt, Phosphor aus Wässern und Schlämmen einer Kläranlage in ökologisch unbedenklichen Mikroorganismen (Brauhefezellen aus Endführungen von Brauereien) zu speichern und damit die vorgenannten Kriterien zu erfüllen. Diese Mikroorganismen sollen von Schadstoffen und pathogenen Keimen getrennt werden. Dadurch soll ein wertvoller organischer Dünger zur Verfügung gestellt werden, der insbesondere einer Anwendung in der ökologischen Landwirtschaft gerecht wird. Dafür wurde eine zweiteilige Pilotanlage aufgebaut und unter Praxisbedingungen getestet. Der Projektpartner CENTEC will in diesem Zusammenhang seinen Ultraschall- und Dichtesensor weiterentwickeln, der *on-line* die Akkumulation von Phosphor in Mikroorganismen misst. Eine exakte Messung biotischer und abiotischer Datensätze ist für die effektive Steuerung komplexer biotechnischer Prozesse wie der Abwasserreinigung in Kombination mit den cytometrischen Tools essentiell.

In einer Kläranlage mit biologischer Phosphatelimination wird der Phosphor, der nicht zum Aufbau der Biomasse benötigt wird, in Polyphosphatgranula verschiedenster Mikroorganismen gespeichert.

Mikrobielle Organismen und auch Hefen, wie z.B. *Saccharomyces cerevisiae*, sind in der Lage, Polyphosphate bis zu einem Anteil von 28% bis 35% (als polyPhosphat) Zelltrockenmasse zu speichern (Christ und Blank, 2019; Vagabov et al., 2000). Das entspricht reinen P-Gehalten in Trockenmasse von 7.35% - 9.19% (70-90 g P/kg TM) und wurde nach spezieller Vorbehandlung der Hefen erreicht (Christ und Blank, 2019). In unbehandelten Brauhefen werden Phosphorwerte zwischen 0,9 - 2% in Trockenmasse gefunden (9,2-20 g P/kg TM, Heuze et al., 2018). In Kläranlagen mit biologischer P-Elimination sind Werte von 4 - 5% P in der bakteriellen Zelltrockenmasse messbar (40-50 g P/kg TM, Blackall et al., 2002). Im Vergleich dazu sind nur 2 - 3% P in der bakteriellen Zelltrockenmasse in Kläranlagen ohne biologische P-Elimination messbar (20 – 30 g P/kg TM, Strom 2006). Die Polyphosphat-tragenden Zellen befinden sich im Belebtschlamm und gelangen mit diesem in das Nachklärbecken, in dem sich die Belebtschlammflocken absetzen und vom geklärten Wasser abgetrennt werden. Diese Belebtschlammflocken enthalten den gewünschten Phosphor und werden typischerweise als Rücklaufschlamm der Belebungsstufe wieder zugeführt, oder als Überschussschlamm zur Energiegewinnung im Faulturn genutzt bzw. entsorgt. Dementsprechend hohe Anteile an Phosphor weist dann das Trübwasser aus dem Faulturn auf, da dort unter anaeroben Bedingungen die gespeicherten Polyphosphate abgebaut und P freigesetzt wird. Dieser hohe Phosphorgehalt ist für die Fermenterbiologie nicht unkritisch, da zu hohe Phosphorkonzentrationen mit einer verminderten Biogasbildung in Verbindung gebracht wurden (Carliell-Marquet und Wheatley, 2002; Günther et al., 2016).

Fazit: In diesem Projekt sollten verschiedene Wässer/Schlämme der Kläranlage zur Rückgewinnung von Phosphor genutzt werden. In Tank 1 der Pilotanlage sollte unter quasi-anaeroben Bedingungen der zuvor gespeicherte Phosphor freigesetzt werden. Das phosphorhaltige Wasser wird in den Tank 2 der Pilotanlage

geleitet. In diesem Behälter sollen sich Bierhefen aus den Endführungen einer naheliegenden Brauerei befinden, die den Phosphor als Granula speichern. Im Anschluss konnten die nun mit P-angereicherten Hefezellen geerntet und das phosphorfreie Wasser in den Kreislauf der Kläranlage rückgeführt werden.

3. Darstellung der Arbeitsschritte

Im Rahmen von 16 Arbeitspaketen wurde untersucht, ob sich die vorgenannte Zielsetzung umsetzen lässt (Abbildung 2).

Arbeitspakete	1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr			
AP1: Aufbau Pilotanlage												
AP2: Test Pilotanlage	MS1											
AP3: Hochskalierung												
AP4: Tests von Tank 1												
AP5: Tests von Tank 2												
AP6: Sensor Kalibrierung												
AP7: P-Rückgewinnung aus Schlamm chem. Fällung					MS2							
AP8-11: Test P-Rückgewinnung aus Schlämmen und Prozesswässern, Mischungen aus Schlämmen und Prozesswässern												
									MS3			
AP12: stabiler Betrieb der Anlage												
AP13: P-Bilanzen												
AP14: Bioinformatische Analyse											MS4	
AP15: Düngemitteltests												
AP16: Qualitätstests												MS5

Abbildung 2. Arbeitsplan mit Arbeitspaketen und Meilensteinen des Projektes.

Für eine Rückgewinnung des Phosphors aus der Kläranlage wurde eine Pilotanlage bestehend aus 2 Einheiten aufgebaut. Beide Einheiten bestehen aus IPC-Tanks mit 1 m³ Volumen. Der erste Tank enthält ein Rührwerk und diente der Rücklösung von Phosphor aus Schlämmen und Prozesswässern. Der rückgelöste Phosphor wurde mit der zellarmen Flüssigkeit in den Tank 2 transportiert, wo eine Belüftungseinheit dafür sorgte, dass die zugesetzten Hefen den Phosphor aus der wässrigen Lösung aufnehmen. Nach Beendigung des Aufnahmeprozesses wurde die Hefe geerntet und hinsichtlich ihrer Eignung als Dünger untersucht. Der Aufbau der Pilotanlage und deren initiale Tests waren Bestandteil von Arbeitspaket (AP) 1 und 2. Die Hochskalierung und Untersuchung des Rückgewinnungsprozesses waren Bestandteil von AP 3 - 5. Die Optimierung des Betriebes mittels Tests verschiedener Schlämme und

Prozesswässer bzw. deren Mischungen stand in den APs 7 - 11 im Vordergrund. P-Bilanzen (AP13) sollten sowohl zur Auswahl P-reicher Schlämme befähigen, den Einfluss von Fällungsmitteln auf den stabilen Betrieb der Anlage (AP 12) verfolgen und beurteilen, ob sich Strukturen und Funktionen von mikrobiellen Gemeinschaften in den verschiedenen Becken und Reaktoren der Abwasseranlage bezüglich veränderter Prozessschritte verändern (AP 14). Das entstandene Produkt wurde in den APs 15 und 16 durch das Pflanzenbau Referat 72, Nossen, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie untersucht. Parallel zu den Versuchen an der Pilotanlage sollten zwei Sensoren der Firma Centec (Dichte- und Ultraschallsensor) den Phosphatgehalt im Medium und den Hefezellen überwachen (AP6).

4. Methoden zu den Arbeitspaketen

Im Folgenden werden zunächst die verwendeten Methoden beschrieben. Sofern diese Methoden von den im Zwischenbericht beschriebenen Verfahren abweichen, wird dies angegeben. In den Arbeitspaketen 7-11 kam es bedingt durch die SARS-CoV-2 Einschränkungen zu zeitlichen und inhaltlichen Abweichungen vom geplanten Projektverlauf. Auf diese wird in den jeweiligen Punkten näher eingegangen.

4.1 Arbeitsschritte zur Erstellung der Phosphorbilanz in der Abwasseranlage (AP13-AP14)

4.1.1. Beprobung der Kläranlagen Prozessströme für die APs 13 und 14

Die Proben wurden aus der Kläranlage Eilenburg (51°28'29.7 "N; 12°37'13.9 "E, Deutschland) entnommen, die das Abwasser von 49.000 Einwohnern behandelt, d.h. bis zu 5'000 m³ pro Tag. P wurde zu Beginn des Projektes und davor hauptsächlich durch biologische P-Elimination entfernt. Zunehmend jedoch erfolgt eine chemische Fällung, um die Einleitgrenzwerte gemäß der deutschen Abwasserverordnung (AbwV, 2020) sicherzustellen. Inwieweit das Einfluss auf den Projektverlauf bezüglich der Rückgewinnung frei verfügbaren Phosphors hatte, wird in den entsprechenden Abschnitten des Abschlussberichtes dargestellt. Das Schema der Kläranlage Eilenburg mit allen Prozessströmen und den 16 Probenahmestellen ist in Abbildung 3 dargestellt.

Für die Erstellung der P-Bilanzen wurden über einen Zeitraum von 748 Tagen in 45 Probenahmekampagnen durchgeführt. Einige Probenahmestellen standen aufgrund betrieblicher Probleme weniger häufig für Probenahmen zur Verfügung. Die Anzahl der Proben war wie folgt: 1.Zulauf (n= 45), 2.Sandfangstart (n= 44), 3.Sandfangende (n= 45), 4.Vorklärbecken (n= 44), 5.Primärschlamm (n= 11), 6.Belüftungsbecken1 (n= 45), 7.Belüftungsbecken2 (n= 45), 8.Fällungsschacht (n= 45), 9. Nachklärbecken1 (n= 44), 10.Nachklärbecken2 (n= 44), 11.Rücklaufschlamm (n= 16), 12.Überschussschlamm (n= 39), 13.Faulschlamm (n= 42), 14.Trübwasser (n= 44), 15.entwässerter Klärschlamm (Feststoffe n= 42, Wasserextrakte n= 42), 16.Ablauf (n= 44). Insgesamt wurden 681 Proben auf abiotische Daten wie Trockensubstanz (TM), Gesamt (total)-P, gebundenes (bound) P und freies (free) P untersucht. Zytometrische Daten wurden aus 465 Proben des Gesamtdatensatzes gewonnen und die Zellhäufigkeiten innerhalb von 68 Gates pro Probe (= Subcommunities, SC) gemessen. Insgesamt wurden 31.620 SC-Daten für bioinformatische Analysen verwendet (siehe Anhang 2, STOTEN, SI Tabelle 3). Alle Proben (Probenahmestellen 1-14, 16) wurden aus dem oberen Drittel des jeweiligen Prozessstroms mit einem manuellen 1-L-Probens schöpfer entnommen. Vor der Entnahme einer Probe wurde der Probenehmer mindestens einmal mit dem Probenmedium gespült. Für den Prozessstrom 15.entwässerter Klärschlamm wurden etwa 0,5 kg frisches Material aus dem Behälter entnommen, gründlich gemischt und

wie unten beschrieben weiterbehandelt. Die Probenahme erfolgte immer zur gleichen Zeit und in der gleichen Reihenfolge der Probenahmestellen. Die Probenvorbereitung begann bei allen Analysen unmittelbar nach der Probenahme.

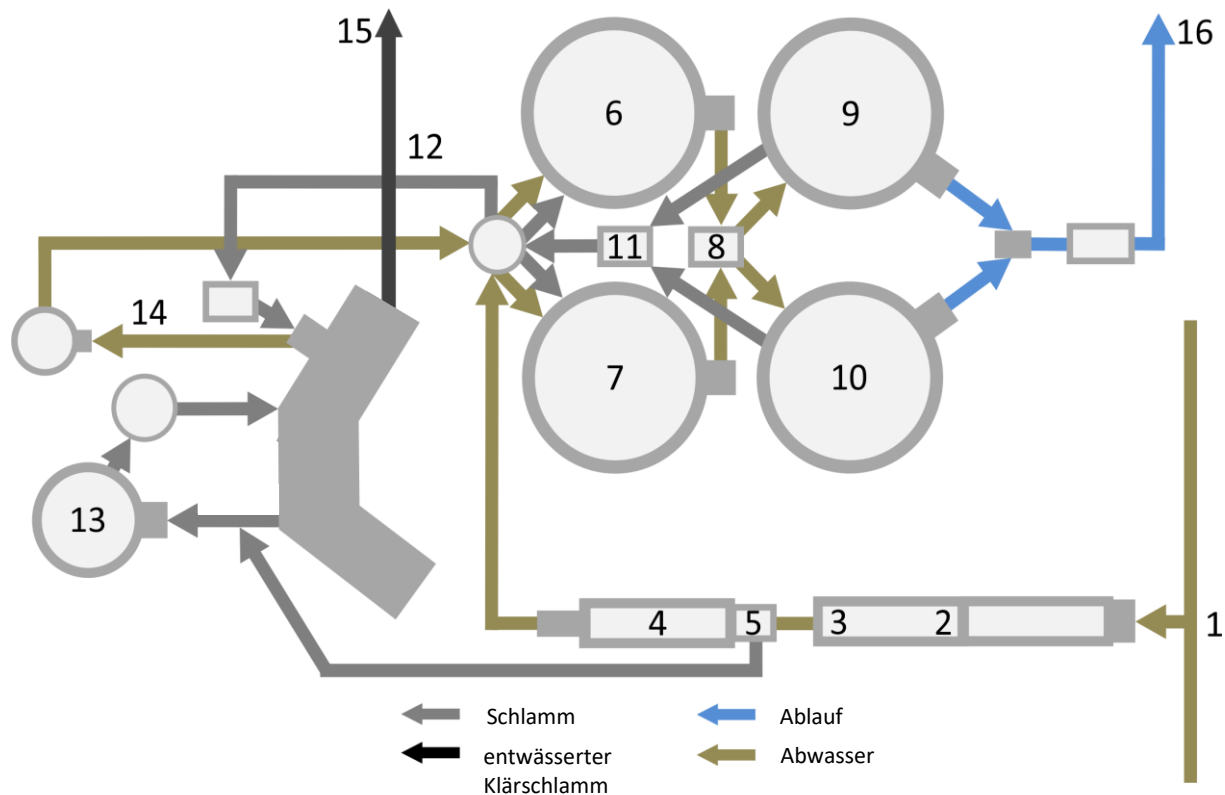


Abbildung 3. Probenahmestellen der Kläranlage. 1 Zulauf, 2 Sandfang (Start), 3. Sandfang (Ende), 4. Vorklärbecken mit Primärschlammabtrennung (5), 6 Belebungsbecken1, 7 Belebungsbecken2, 8 Fällungsschacht, 9 Nachklärbecken1, 10 Nachklärbecken2, 11 Rücklaufschlamm, 12 Überschussschlamm, 13 Faulturm, 14 Trübwasser, 15 entwässerter Klärschlamm, 16 Ablauf. Die hydraulische Verweilzeit an den Probenahmestellen 1-7, 9-12 und 14-15 beträgt weniger als 24 h. Die hydraulische Verweilzeit von 13 Faulturm beträgt ca. 30 d.

4.1.2. Bestimmung der Trockenmasse (TM) der Prozessströme für die APs 13 und 14

Die TM-Messung wurde für alle Proben durchgeführt, für die P-Konzentrationen bestimmt wurden. Die Proben wurden je nach Dichte der Biomasse in 50 ml oder 15 ml Falcon-Röhrchen gesammelt und bei $3.200 \times g$ für 10 min bei $4^\circ C$ zentrifugiert (Eppendorf Zentrifuge 5804 R, Hamburg, Deutschland). Der Überstand wurde verworfen. Nachfolgend wurden die Proben durch einen weiteren Zentrifugationsschritt von noch vorhandenen Flüssigkeiten abgetrennt: die Pellets wurden in 2 ml Eppendorf-Gefäßen überführt und ein zweites Mal bei $6.000 \times g$ für 10 min bei $4^\circ C$ zentrifugiert (Thermo Scientific Fresco 21, Langenselbold, Deutschland). Der Überstand wurde verworfen und das Pellet für 3 d bei $50^\circ C$ getrocknet. Die TM wurde mit der Sartorius BP 110 Waage (Göttingen, Deutschland) bestimmt und die Werte auf die Probenvolumina korrigiert (Gleichung 2, siehe Punkt 4.1.7). Dieser TM-Wert wurde zur Berechnung des P-Gehaltes in TM (Gleichung 3, siehe Punkt 4.1.7) verwendet. Das Verfahren wurde in Triplikaten durchgeführt.

4.1.3 Bestimmung von total P und free P der Prozessströme für die APs 13 und 14

Von allen Proben 1-14 und 16 wurden sowohl die flüssige als auch die feste Phase in die Analysen einbezogen. Für die P-Analysemethode wurden je nach erwarteter Konzentration etwa 0,5 ml pro Probe entnommen und verdünnt. Die total P Konzentration (Gesamtposphor) wurde mit dem Phosphat 15-Kit (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren, Deutschland) nach einer Standardmethode (DIN EN ISO 6878:2004-09) bestimmt. Die Proben wurden mit dem Heizblock Nanocolor Vario C2 (Macherey-Nagel GmbH & Co. KG, Düren, Deutschland) für 30 min bei 120 °C aufgeschlossen, um biologisch und chemisch gebundenes P freizusetzen. Nach dem Aufschluss wurden die am Spektrophotometer der Firma Macherey-Nagel GmbH & Co gemessen. Gelöstes Phosphat (free P) wurde durch Zentrifugation der gesamten Proben bei 3.200 g und 4 °C, 10 min (Eppendorf Zentrifuge 5804 R, Hamburg, Deutschland) und unter ausschließlicher Verwendung des Überstandes mit dem gleichen Phosphat 15-Kit bestimmt. Diese Daten wurden an den abschließenden 11 Tagen der Probenahme gemessen, und die anderen Daten wurden auf der Grundlage des erhaltenen Durchschnitts berechnet. Alle Werte von *ortho*-P werden im Bericht als elementarer total P (γ (P)_{TP}, kg m⁻³) oder free P (γ (P)_{FP}, kg m⁻³) bezeichnet und mit einem Umrechnungsfaktor von 3,07 für PO₄³⁻ in P (Macherey-Nagel) berechnet. Bei dem entwässerten Klärschlamm wurde P in 0,5 g Originalsubstanz bestimmt, die für 10 min in 4,5 ml bidestilliertem Wasser suspendiert und durch Vortexen homogenisiert wurde (PV-1 Vortex Mixer, Grant Instruments, Cambridgeshire, UK). Danach wurde der total P in der gesamten Probe bestimmt. Free P wurde wie zuvor nach Zentrifugation im Überstand analysiert. Das gebundene P (bound P) wird wie in Gleichung 1 (siehe Punkt 4.1.7) angegeben berechnet, mit Ausnahme des entwässerten Klärschlammes. Hier wurde das gebundene P in der Trockensubstanz von einem akkreditierten externen Labor nach einer Standardmethode (DIN EN ISO 17294-2, über ICP-OES) gemessen. Die Werte von total P, free P und bound P wurden zur Berechnung der jeweiligen Massenbelastungsrate verwendet (Gleichungen 14-16, siehe Punkt 4.1.7).

4.1.4 Bestimmung der Dichte der Prozessströme für die APs 13 und 14

Die Dichte (ρ , kg m⁻³, Gleichung 4, unter Punkt 4.1.x) von Proben von flüssigen und festen Prozessströmen wurde gemessen, um Umrechnungen von Volumenbelastungsraten in Massenbelastungsraten und umgekehrt zu ermöglichen. Die Dichte wurde als Durchschnittswerte in einem 100 ml Messzylinder berechnet, der nach dem Befüllen mit der jeweiligen Prozessstromprobe gewogen wurde. Der Dichtewert des entwässerten Klärschlammes wurde nach Spellman (1996) mit 800 kg m⁻³ angenommen.

4.1.5 Durchflussszytometrische Messung der Prozessströme für die APs 13 und 14

Die Proben wurden unmittelbar nach der Probenahme in 8 % Paraformaldehyd für 30 min bei Raumtemperatur (RT) im Verhältnis 1:4 (Vol_{Probe}/Vol_{Fixativ}), mit einer Endkonzentration von 2% fixiert. Nach Zentrifugation (3.200 x g, 10 min, 4 °C) wurden die Zellen in 70%igem Ethanol resuspendiert und bei -20 °C gelagert (Günther et al., 2016). Die Färbung der Zellen wurde wie in Cichocki et al. (2020) beschrieben durchgeführt und die Messung erfolgte mittels Durchflussszytometrie. Vor der Messung wurden den gefärbten Zellen 0,5 µm und 1,0 µm UV-Fluoresbrite-Mikropartikel (Polysciences, Warrington, PA, USA) als interner Marker für die Messgenauigkeit hinzugefügt. Die Proben wurden mit einem Prototyp CyFlow-Space (Partec, Görlitz, Deutschland) analysiert, der mit einem 355 nm-Laser (Genesis CX355 -60 STM OPS Laser-Dioden-System, Coherent, CA, USA) ausgestattet war und mit 50 mW betrieben wurde. Die

Probendurchflussrate des Zytometers betrug 0,5 µl/s bei 1000 Ereignissen/s. Für jede Probe wurden 250.000 gefärbte Zellen vermessen. Als Sheath-Flüssigkeit wurde täglich erneuertes bidestilliertes Wasser verwendet. Das Gerät wurde mit den gleichen Mikropartikeln wie oben und einem DAPI-gefärbten Bakterienstandard mit bekanntem DNA-Muster kalibriert. Alle Rohdaten sind in der FlowRepository (<https://flowrepository.org/>) unter den Zugangsnummern FR-FCM-Z2QU und FR-FCM-Z2TP abrufbar. Nach der Generierung eines Zellgates, um Beads und Rauschen auszuschließen, wurden 68 Gates für alle aufgezeichneten Proben definiert, um das Gate-Template zu erstellen (Anhang 2: STOTEN, SI Abbildung 2). Die Auswertung der Gate-Daten wurde mit der Software FlowJo Version 10.6.2 (FlowJo LLC, Oregon, USA) durchgeführt. Ereignisse in überlappenden Gateregionen wurden von der Analyse ausgeschlossen, indem proportionale Partikelzahlen vom Gate subtrahiert wurden. Nur Gates mit einer mittleren Zellabundanz über 1 % wurden in Korrelationsanalysen der Daten einbezogen.

4.1.6 Bioinformatische Analyse der Prozessströme für die APs 13 und 14

Die zytometrischen Daten wurden mit den bioinformatischen Werkzeugen flowCyBar unter Verwendung der R-Pakete "flowCyBar" (Koch et al., 2013), "flowCore" (Hahne et al., 2009), "hexbin" (Car et al., 2019), "vegan" (Oksanen et al., 2015) und "ggplot2" (Wickham, 2016) mit R-Version 3.6.1 (RCoreTeam, 2018) ausgewertet. NMDS-Plots von flowCyBar-abgeleiteten Daten wurden unter Verwendung von Bray-Curtis-Ähnlichkeiten erstellt. Die Schwerpunkte in NMDS-Plots (Anhang 2: STOTEN, Abbildung 3) und die Abstände zwischen Schwerpunkt und den Proben wurden mit den R-Paketen "tcltk" (RCoreTeam, 2018) und "raster" (Hijmans und van Etten, 2014) berechnet. Die Korrelationen zwischen den vom Gate abgeleiteten Subgemeinschaften und den abiotischen Parametern wurden wie von Günther et al. (2016) beschrieben mit dem Paket "Hmisc" (Harrell et al., 2018) durchgeführt, wobei der Korrelationskoeffizient rho der Spearmans Rangfolge mit einem Signifikanzwert $P < 0,05$ berechnet wurde. Der erste Korrelationswert wurde unter Verwendung der ersten 4 Proben ermittelte und jeder rho- und P-Wert wurde in einer R-internen Arbeitstabelle dokumentiert. Dann wurde der nächste Stichprobentag zur Matrix hinzugefügt und die Korrelation für den erweiterten Datensatz erneut durchgeführt. Dieses Verfahren wurde wiederholt, bis alle Proben Tage Teil der Korrelationsmatrix sind. Die Visualisierung der einzelnen rho- und P-Werte wurde durchgeführt unter Verwendung von Heatmaps und der Zusammenfassung als Circos-Plots mit dem R-Paket "circlize" (Gu et al., 2014).

4.1.7 P-Bilanzen der Prozessströme für die APs 13 und 14

Die täglichen Volumendurchflussraten (Q) wurden entweder direkt von der Kläranlage bezogen oder berechnet (Gleichung 5 - Gleichung 13) und dann zur Berechnung der täglichen P-Massenbelastungsrate ($\dot{m}$) für free P (Gleichung 14, 17), total P (Gleichung 15, 18) und bound P (Gleichung 16, 19) verwendet. Alle Werte hierfür sind in dem Anhang 2: STOTEN SI-Tabelle 3 angegeben.

Gleichungen:

(1) Bound P ($\gamma(P)_{BP}$, kg m⁻³) wurde als Differenz zwischen total P und free P wie folgt berechnet:
Gleichung (1) $\gamma(P)_{BP} [\text{kg/m}^3] = \gamma(P)_{TP} [\text{kg/m}^3] - \gamma(P)_{FP} [\text{kg/m}^3]$

(2) Die Trockenmasse TM wurde als Massenkonzentration (γ_{TM} , kg/m³) in Bezug auf das anfängliche Probenvolumen (V_{Probe} , m³) und der Masse (m_{TM} , kg) wie folgt berechnet:
Gleichung (2) $\gamma_{DM} [\text{kg/m}^3] = m_{DM} [\text{kg}] / V_{Probe} [\text{m}^3]$

(3) P-Gehalt in TM (g P/kg TM) für die Probenahmestellen 1.-14. und 16. wurde unter Verwendung der Massenkonzentration des bound P (γ_{BP} , g/m³) geteilt durch die Massenkonzentration der TM (γ_{TM} , kg/m³) wie folgt berechnet:

Gleichung (3)
$$\text{P-Gehalt in TM [g P/kg TM]} = \gamma_{BP} [\text{g/m}^3] / \gamma_{DM} [\text{kg/m}^3]$$

(4) Zur Berechnung der Dichte (ρ , kg/m³) wurde die folgende Gleichung verwendet:
Gleichung (4)
$$\rho [\text{kg/m}^3] = m[\text{kg}] / V [\text{m}^3]$$

(5-6) Zur Berechnung der Primärschlamm-Volumenbelastungsrate (Q_5 , m³/d) wurde erstens die Volumenbelastungsrate des eingedickten Überschussschlammes (Q_{tES} , m³/d) und zweitens die Volumenbelastungsrate des Faulturmzulaufs benötigt (Q_{feedAD} , m³/d). Q_{tES} musste berechnet werden, während Q_{feedAD} von den Kläranlagenbetreibern bereitgestellt wurde. Q_{tES} wurde aus dem Volumenreduktionsparameter des Überschussschlammes (Q_{12} , m³/d) berechnet, wie es laut Peirce et al. (1998) für diesen Fall am besten ist. Die Reduktion des Schlammes lag bei 80 % und erhöhte die TM auf bis zu 5%. Im Projektverlauf wurde der TM-Anteil im Überschussschlamm von etwa 1,3% auf 7% erhöht. Das zur Eindickung von Überschussschlamm durch Bindung des Wassers verwendete Polymer war Reiflock RF600 (Reiflock Abwassertechnik GmbH, Baden-Baden, Deutschland).

Gleichung (5)
$$Q_{tES} [\text{m}^3/\text{d}] = Q_{12} [\text{m}^3/\text{d}] \times 0.2$$

Gleichung (6)
$$Q_5 [\text{m}^3/\text{d}] = Q_{feedAD} [\text{m}^3/\text{d}] - Q_{tES} [\text{m}^3/\text{d}]$$

(7) Die Volumenbelastungsrate für die Belebungsbecken1,2 ($Q_{6,7}$ m³/d, ($Q_6 = Q_7$)) wurde unter Verwendung der Summe der Volumenbelastungsrate von den Nachklärbecken1,2 ($Q_{9,10}$ m³/d, ($Q_9 = Q_{10}$)) (Gleichung 9) und Überschussschlamm (Q_{12} , m³/d) wie folgt berechnet:

Gleichung (7)
$$Q_{6,7} [\text{m}^3/\text{d}] = (Q_9 [\text{m}^3/\text{d}] + Q_{10} [\text{m}^3/\text{d}] - Q_{12} [\text{m}^3/\text{d}]) / 2$$

(8) Die Volumenbelastungsrate für den Fällungsschacht (Q_8 , m³/d) wurde aus den Werten für die Volumenbelastungsrate der Belebungsbecken1,2 ($Q_{6,7}$ m³/d) berechnet:

Gleichung (8)
$$Q_8 [\text{m}^3/\text{d}] = Q_{6,7} [\text{m}^3/\text{d}] \times 2$$

(9) Die Volumenbelastungsrate für die Nachklärbecken1,2 ($Q_{9,10}$ m³/d, ($Q_9 = Q_{10}$)) wurde unter Verwendung der Volumenbelastungsrate vom Ablauf (Q_{16} , m³/d) und Rücklaufschlamm (Q_{11} , m³/d) berechnet:

Gleichung (9)
$$Q_{9,10} [\text{m}^3/\text{d}] = (Q_{16} [\text{m}^3/\text{d}] + Q_{11} [\text{m}^3/\text{d}]) / 2$$

(10-13) Faulschlamm wird zur Schlammmentwässerung (Faulschlammmentwässerung Q_{DSD} , m³/d) transportiert, wo er dann in zwei Ströme aufgeteilt wird: Trübwasser (Q_{14} , m³/d) und entwässerter Klärschlamm (Q_{15} , m³/d). Die Volumenbelastungsrate der Faulschlammmentwässerung (*digested sludge dewatering* DSD) (Q_{DSD} , m³/d) und die Volumenbelastungsrate vom entw. Klärschlamm (Q_{15} , m³/d) wurden von den Kläranlagenbetreibern erfasst. Die Massenbelastungsrate vom Trübwasser ($\dot{m}_{14}$, kg/d) wurde aus den Volumenbelastungsrate der Faulschlammmentwässerung (Q_{DSD} , m³/d) und entw. Klärschlamm (Q_{15} , m³/d) berechnet, die in Massenbelastungsrate (Gleichungen 10 - 11) unter Berücksichtigung der Dichte ρ_{DSD} , ρ_{15} (kg/m³) umgewandelt wurden.

Gleichung (10)
$$\dot{m}_{DSD} [\text{kg/d}] = Q_{DSD} [\text{m}^3/\text{d}] \times \rho_{DSD} [\text{kg/m}^3]$$

Gleichung (11)
$$\dot{m}_{15} [\text{kg/d}] = Q_{15} [\text{m}^3/\text{d}] \times \rho_{15} [\text{kg/m}^3]$$

Um die Massenbelastungsrate vom Trübwasser ($\dot{m}_{14}$, kg/d) zu erhalten, wurde die Massenbelastungsrate von entw. Klärschlamm ($\dot{m}_{15}$, kg/d) von der Massenbelastungsrate von DSD ($\dot{m}_{DSD}$, kg/d) subtrahiert:
Gleichung (12) $\dot{m}_{14} \text{ [kg/d]} = \dot{m}_{DSD} \text{ [kg/d]} - \dot{m}_{15} \text{ [kg/d]}$

Die Massenbelastungsrate des Trübwassers wurde mit der bekannten Dichte (ρ_{14} , kg/m³) zurück auf die Volumenbelastungsrate (Q_{14} , m³/d) umgerechnet:

Gleichung (13) $Q_{14} \text{ [m}^3\text{/d]} = \dot{m}_{14} \text{ [kg/d]} / \rho_{14} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

(14-16) Die Massenbelastungsraten ($\dot{m}_{\text{Probenahmestelle}}$, kg/d) wurden aus den Volumenbelastungsraten und der P-Konzentration bestimmt:

Gleichung (14) $\dot{m}_{FP \text{ Probenahmestelle}} \text{ [kg/d]} = Q_{\text{Probenahmestelle}} \text{ [m}^3\text{/d]} \times \gamma(P)_{FP \text{ Probenahmestelle}} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Gleichung (15) $\dot{m}_{TP \text{ Probenahmestelle}} \text{ [kg/d]} = Q_{\text{Probenahmestelle}} \text{ [m}^3\text{/d]} \times \gamma(P)_{TP \text{ Probenahmestelle}} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Gleichung (16) $\dot{m}_{BP \text{ Probenahmestelle}} \text{ [kg/d]} = Q_{\text{Probenahmestelle}} \text{ [m}^3\text{/d]} \times \gamma(P)_{BP \text{ Probenahmestelle}} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

(17-19) Für die Massenbelastungsrate des Faulschlammes wurde das Volumen des Schlammes für die Schlammmentwässerung (DSD, Faulschlammmentwässerung Q_{DSD} , m³/d) verwendet. Die DSD-Volumenbelastungsrate wurde von den Kläranlagenbetreibern erhoben:

Gleichung (17) $\dot{m}_{FP 13} \text{ [kg/d]} = Q_{DSD} \text{ [m}^3\text{/d]} \times \gamma(P)_{FP 13} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Gleichung (18) $\dot{m}_{TP 13} \text{ [kg/d]} = Q_{DSD} \text{ [m}^3\text{/d]} \times \gamma(P)_{TP 13} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Gleichung (19) $\dot{m}_{BP 13} \text{ [kg/d]} = Q_{DSD} \text{ [m}^3\text{/d]} \times \gamma(P)_{BP 13} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

4.1.8 Unterscheidung zwischen biologisch und chemisch entferntem P für die APs 13 und 14

In der Kläranlage Eilenburg wird die P-Konzentration routinemäßig nur im Zulauf und im Ablauf gemessen und mittels biologischer Elimination entfernt. Wenn bei der 2017 eingeführten automatischen Ablaufmessung ein kritischer P-Wert gemessen wird, wird P zusätzlich durch Zugabe des chemischen Fällungsmittels Ferriflock (Kronos International Inc., Leverkusen, Deutschland) in den Fällschacht ausgefällt. Um die Mengen des biologisch entfernten P und auch die des chemisch ausgefällten P zu bestimmen, wurden die total P-Massenbelastungsraten im Zulauf und im Ablauf als Systemgrenzen festgelegt.

Die total P-Massenbelastungsrate im Zulauf ($\dot{m}_{TP 1}$, kg/d) wurde aus der Volumenbelastungsrate des Zulaufs (Q_1 , m³/d) und der total P Konzentration im Zulauf ($\gamma(P)_{TP 1}$, kg/m³) berechnet:

Gleichung (20) $\dot{m}_{TP 1} \text{ [kg/d]} = Q_1 \text{ [m}^3\text{/d]} \times \gamma(P)_{TP 1} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Die total P-Massenbelastungsrate des Abflusses ($\dot{m}_{TP 16}$ kg/d) wurde analog zu der des Zulaufs berechnet.

Gleichung (21) $\dot{m}_{TP 16} \text{ [kg/d]} = Q_{16} \text{ [m}^3\text{/d]} \times \gamma(P)_{TP 16} \text{ [kg/m}^3\text{]}$

Die tägliche Volumenbelastungsrate von Ferriflock ($Q_{\text{Ferriflock}}$, m³/d) wurde von den Kläranlagenbetreibern und die Ferriflock-Dichte ($\rho_{\text{Ferriflock}}$, kg/m³) vom Hersteller (Kronos International Inc., 2012) erhoben. Das chemische P-Fällungsmittel Ferriflock hat eine Dichte ($\rho_{\text{Ferriflock}}$) von 1520 kg/m³ und enthält 123 g Eisen pro kg Ferriflock ($\omega_{\text{Fe-Ferriflock}} = 0,123$). Die Massenbelastungsrate von zugesetztem Ferriflock ($\dot{m}_{\text{Ferrifloc}}$, kg/d) wurde aus der Ferriflock-Volumenbelastungsrate ($Q_{\text{Ferrifloc}}$ m³/d) und der Ferriflock-Dichte ($\rho_{\text{Ferriflock}}$, kg/m³) berechnet:

Gleichung (22) $\dot{m}_{\text{Ferriflock}} [\text{kg/d}] = Q_{\text{Ferriflock}} [\text{m}^3/\text{d}] \times \rho_{\text{Ferriflock}} [\text{kg/m}^3]$

Die Massenbelastungsrate von Eisen (Fe-Ionen) in Ferriflock ($\dot{m}_{\text{Fe}}$, kg/d) wurde aus der bekannten Massenbelastungsrate von zugesetztem Ferriflock ($\dot{m}_{\text{Ferriflock}}$, kg/d) und dem Eisenmassengehalt im Ferriflock ($\omega_{\text{Fe-Ferriflock}}$) berechnet:

Gleichung (23) $\dot{m}_{\text{Fe}} [\text{kg/d}] = \dot{m}_{\text{Ferriflock}} [\text{kg/d}] \times \omega_{\text{Fe-Ferriflock}}$

Die Fe-Ionen-Dosierung von Ferriflock beträgt 1,5 Fe-Ionen für jedes elementare P (β -Wert, Kläranlagenbetreiber, persönliche Mitteilung 2019). Das Molverhältnis von Fe zu P beträgt 2,7, was bedeutet, dass 2,7 kg Ferriflock unter der Annahme, dass jedes Fe-Ion ohne Nebenproduktbildung verwendet wird, 1 kg P ausfällt. Daher kann die Massenbelastungsrate von ausgefälltem P ($\dot{m}_{\text{pprecip}}$, kg/d) wie folgt berechnet werden:

Gleichung (24) $\dot{m}_{\text{pprecip}} [\text{kg/d}] = \dot{m}_{\text{Fe}} [\text{kg/d}] / 2.7$

Die P-Massenbelastungsrate von biologisch entferntem P ($\dot{m}_{\text{Pbiol}}$, kg/d) wurde durch Subtraktion der ausgefällten total P-Massenbelastungsrate ($\dot{m}_{\text{pprecip}}$, kg/d) und der total P-Massenbelastungsrate im Ablauf ($\dot{m}_{\text{TP 16}}$, kg/d) von der gesamten P-Massenbelastungsrate des Zulaufs ($\dot{m}_{\text{TP 1}}$, kg/d) berechnet:

Gleichung (25) $\dot{m}_{\text{Pbiol}} [\text{kg/d}] = \dot{m}_{\text{TP 1}} [\text{kg/d}] - \dot{m}_{\text{pprecip}} [\text{kg/d}] - \dot{m}_{\text{TP 16}} [\text{kg/d}]$

Mit den P-Massenbelastungsraten des Zulaufs und des Ablaufes wurde der Abscheidegrad (RE, %) berechnet:

Gleichung (26) $\text{RE} [\%] = 100 [\%] - ((\dot{m}_{\text{TP 16}} [\text{kg/d}] / \dot{m}_{\text{TP 1}} [\text{kg/d}]) \times 100 [\%])$

4.2 Arbeitsschritte zum Aufbau und Testung der Pilotanlage (AP1-AP5)

Wie im Zwischenbericht vom 19.07.2019 beschrieben wurde die aus 2 Einheiten bestehende Pilotanlage erfolgreich konzipiert, aufgebaut und in Betrieb genommen (Zwischenbericht, S. 11-14).

4.2.1 Beprobung der Pilotanlage Tank 1 und Tank 2 (AP1-AP5)

Für eine Rückgewinnung des Phosphates wurde zunächst eine Pilotanlage bestehend aus 2 Einheiten geplant und durch die Firma Eilenburger Elektrolyse- und Umwelttechnik GmbH aufgebaut (siehe Zwischenbericht 2019 Abb.7, S. 12). Entsprechend der durchgeführten Phosphorbilanz (siehe oben) in der Abwasseranlage wurden folgende Schlämme und Wässer für die Phosphorrückgewinnung ausgewählt: Überschussschlamm (stellvertretend auch für den Rücklaufschlamm), Faulschlamm, Trübwasser und entwässerter Klärschlamm. Die Schlämme und Wässer wurden in Tank 1 über verschiedene Zeiten und unter langsamen Rühren unter nahezu anaeroben Bedingungen inkubiert (siehe weiter unten). Proben vom Tank 1 wurden für die Substrate Trübwasser, Faul- und Klärschlamm aus dem rot markierten Probehahn in Abbildung 4 a) entnommen. Proben vom Überschussschlamm wurden jeweils am 3. Ablaufhahn (Abbildung 4 a, blau markierte Nr. 3, 3. Ventil von oben) entnommen. Danach erfolgte die Überführung des P-angereicherten Überstands in den aeroben Tank 2. Dort wurden Proben aus Tank 2 mit einem 2-l-Probeschöpfer kurz über der Belüftungseinheit entnommen. Vor der Probenahme wurde der Schöpfer jeweils 2x mit dem Probemedium gespült.

Die verwendeten Hefen als potentielle Phosphorakkumulierer wurden ebenfalls beprobt. Für die Probenahme aus den Hefekanistern aus der Brauerei wurden die feste und flüssige Phase gemischt. Anschließend wurden die Hefen wie unten beschrieben als Substrat für die P-Aufnahme vorbereitet. Sowohl von den Hefekanistern als auch von der vorbereiteten Hefe für Tank 2 wurden Proben entnommen.

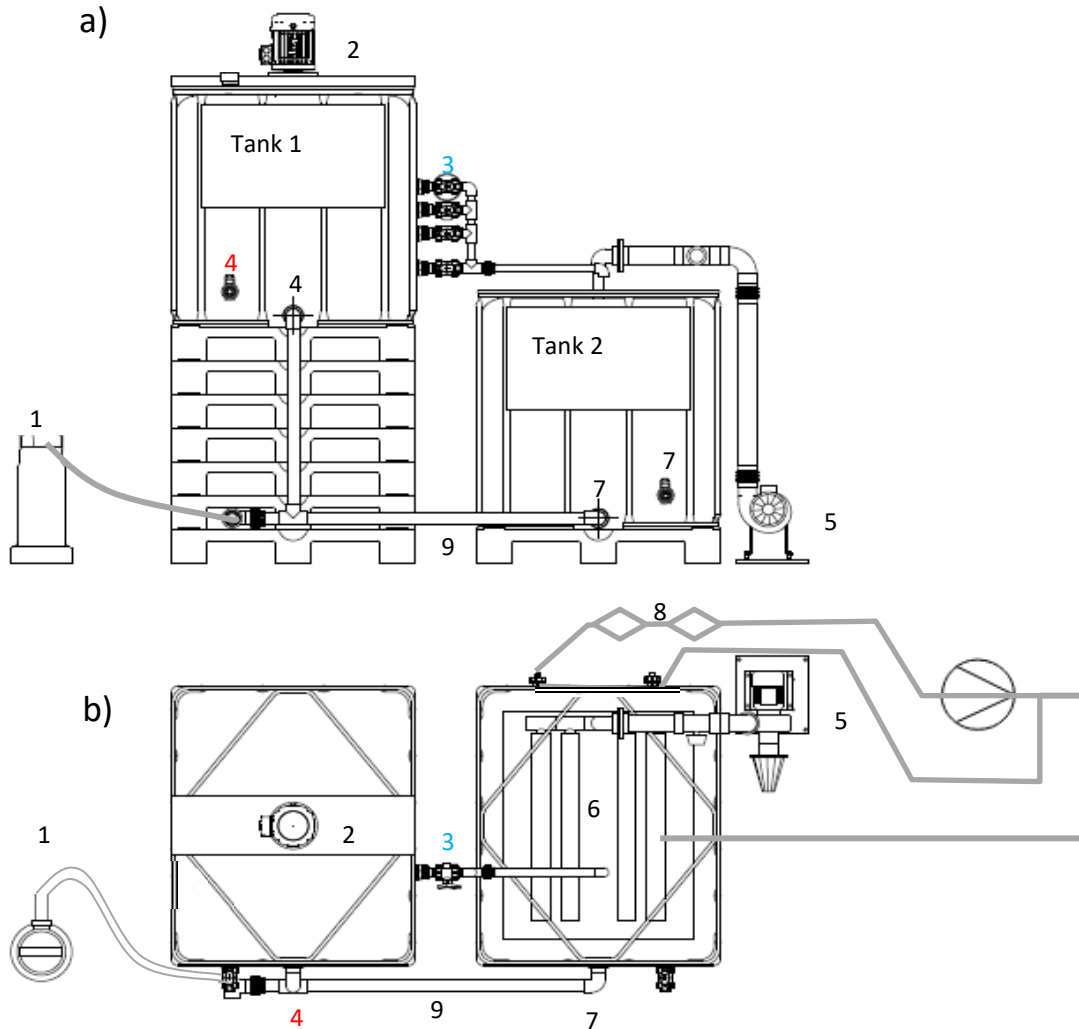


Abbildung 4. Schematischer Aufbau der Pilotanlage. Beide abgebildete Tanks sind IBC-Tanks mit 1 m³ Volumen. a) Seitenansicht, b) Draufsicht; 1: Tauchpumpe, 2: Rührwerk, 3: mechanischer Überlauf mit 4 Ventilen, 4: Probenahme und Ein-/Auslassventile, 5: Kompressor, 6: Belüftungseinheit mit Filterkerzen, 7: Probenahme und Ein-/Auslassventile, 8: Sensorsystem mit Pumpe ("Sensorbypass"), 9: Ablauf

4.2.2 Bestimmung von FM und TM in Proben der Pilotanlage (AP1-AP5)

Die FM und TM Werte für die Schlämme und Wässer in Tank 1 und Tank 2 sind entsprechend dem Punkt 4.1.2 (Vucic et al., 2021) bestimmt worden.

Die FM und TM für die Hefen wurden ebenfalls nach dem publizierten Protokoll (Vucic et al., 2021) durchgeführt: 50 ml Falcon-Röhrchen und 2 ml Eppendorf Gefäßen wurden verwendet. Nach Zentrifugation (10 min, 3200xg, Falcons) und anschließenden 10 min, 6000xg (Eppendorf-Gefäße) wurde der Überstand für die Bestimmung von free P verwendet. Die Pellets wurden zunächst als FM vermessen und anschließend bei 50°C für 3 Tage getrocknet und die TM gemessen. Alle Messungen wurden mindestens als Duplikate (in der Regel als Triplikate) durchgeführt.

Die Hefen wurden vor Beginn der Aktivierung des Moduls direkt aus der nahegelegenen Brauerei geholt. Die Qualität der Hefen bezüglich FM, Atmungsaktivität und damit der Fähigkeit Phosphor zu speichern war zu diesem Zeitpunkt nicht bekannt. Da generell Resthefen aus der Brauerei eingesetzt werden, kann die Qualität der einzelnen Hefechargen sehr unterschiedlich sein. Wie bereits im Zwischenbericht dargestellt,

unterscheiden sich die Chargen der Hefen teils erheblich z.B. in den Eigenschaften Absetzverhalten und Schaumbildung (Zwischenbericht, Punkt 4.4 S. 25).

Wie groß diese Unterschiede sein können, lässt sich aus Abbildung 5 ableiten. Hier sind die Trocken- und Frischmassen der Brauhefen entweder als Massenkonzentration (links) oder als Masse (rechts) gegeneinander aufgetragen. Die Spanne reicht dabei von 250 kg/m³ FM (= 58 kg/m³ TM) bis hin zu 660 kg/m³ FM (= 179 kg/m³ TM). Beide Parameter lassen sich anhand der Kurve voneinander ableiten. Das erleichtert die Berechnung der einzusetzenden Hefemenge in den Tank 2 der Pilotanlage erheblich, da zu Beginn der Befüllung von Tank 2 nur die FM der Brauhefe bestimmt werden kann (der Wert zu den entsprechenden TM – Werten steht erst nach 3 Tagen zur Verfügung). Da nicht von allen Proben im Verlaufe der Modalexperimente parallel entweder FM oder TM bestimmt werden konnte, wurde, diese Kalibrierungskurven verwendet, um beide Parameter ineinander umzurechnen mit dem Faktor 3.79.

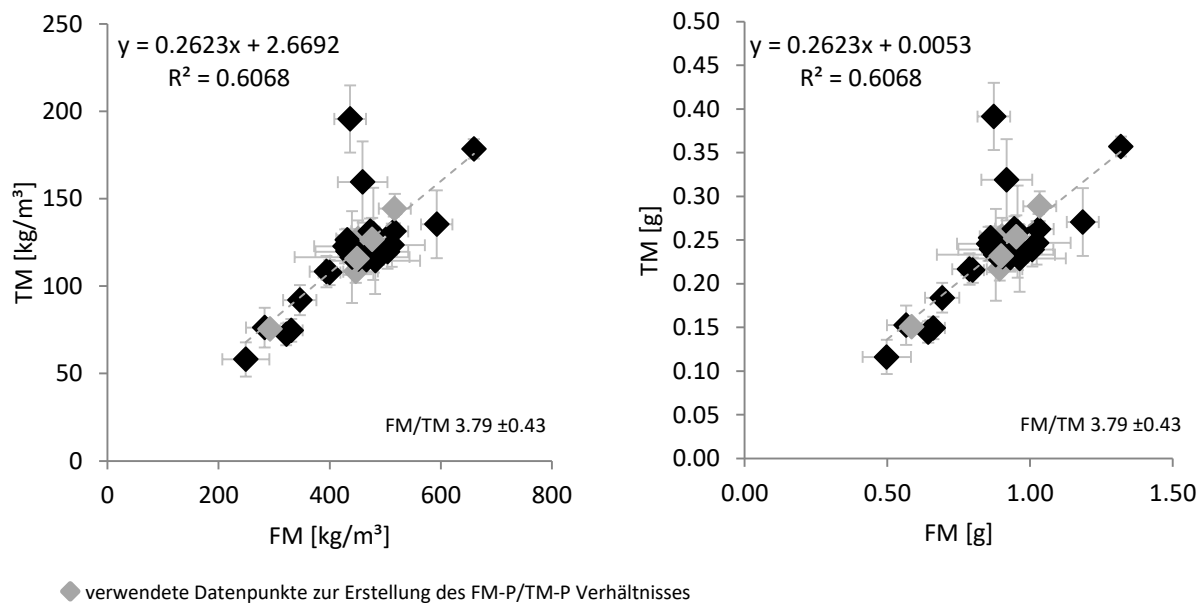


Abbildung 5. Verhältnis von Frisch- zu Trockenmasse in Brauhefechargen in kg/m³ (links) oder g (rechts). Der Umrechnungsfaktor für beide Parameter beträgt 3,79. Die in grau dargestellten Datenpunkte sind die Ausgangsbasis für die Ermittlung von gebundenem Phosphor in FM und TM von verschiedenen Hefechargen (Abbildung 6)

Die Unterschiedlichkeit der Hefeeigenschaften spiegeln sich auch in den gebundenen Phosphorwerten wieder. Proben verschiedener Hefechargen wurden auf ihre Phosphorwerte hin untersucht. Die Abweichungen zwischen den einzelnen Hefechargen sind dabei erheblich.

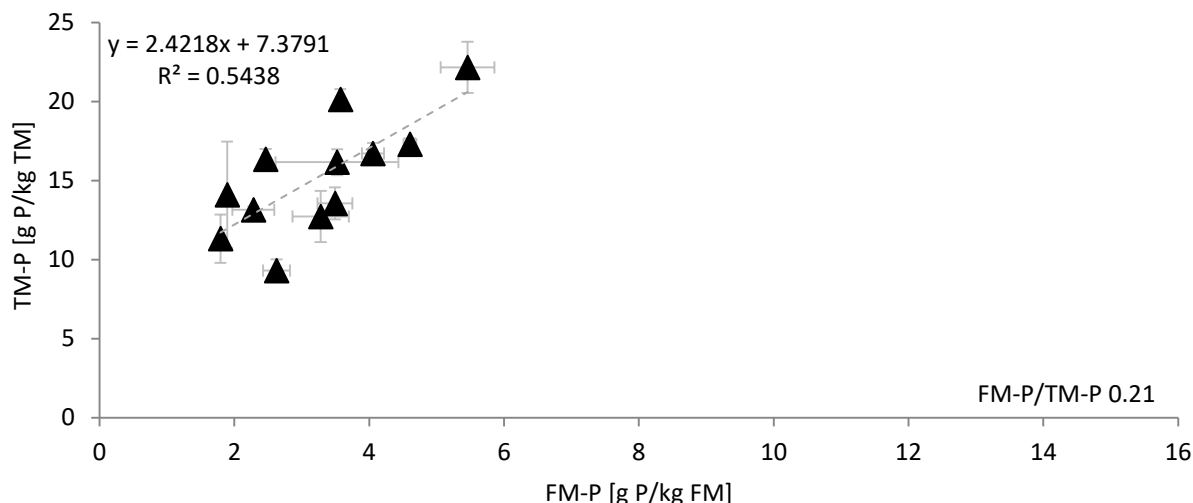


Abbildung 6. Phosphorgehalte in FM zu P in TM (FM-P/TM-P, beides in g P/kg FM oder TM) von verschiedenen Hefechargen. Die Abweichungen in den P-Gehalten der einzelnen Hefechargen können erheblich sein.

4.2.3 Bestimmung von Gesamt-P und freiem P in der Pilotanlage (AP1-AP5)

Die Messungen wurden wie unter Punkt 4.1.3 beschrieben durchgeführt. Auch hier wurde der Küvettentest der Firma Macherey-Nagel gemäß der Protokolle des Herstellers verwendet. Bound P wurde nach Gleichung 1 (Punkt 4.1.7) berechnet.

Für die Vorversuche mit der Hefe in Tank 2 unter 2 kgTM/m³ wurde die im Zwischenbericht beschriebene Methode („Anorganisches ortho-P - Bestimmung mittels Küvettentest“ und „Gesamt-P Bestimmung in der Biomasse von mikrobiellen Proben (Bakterien/Hefen) mittels Küvettentest“, S. 7) verwendet. Alle Vorversuche sind im Anhang 4 zu finden.

4.2.4 Bioinformatische Analyse der Daten zur Erkennung und Behandlung von Extremwerten

Das wichtigste Hilfsmittel zur Analyse der Daten neben den unter Punkt 4.1.6 aufgezählten R Paketen ist der 1,5 Interquartilabstand (IQR – inter quartile range). Der IQR Test ermöglicht die Bestimmung von gemessenen Extremwerten (Walfish, 2006). Dafür werden zunächst das 1. Quartil (Q1) und das 3. Quartil (Q3) der Daten ermittelt. Dann wird die Differenz (IQR – inter quartile range) bestimmt: IQR = Q3-Q1. Der IQR wird dann mit dem Faktor 1,5 multipliziert und von Q1 subtrahiert bzw. zu Q3 addiert. Die entstehenden Zahlen Q1_{IQR}, Q3_{IQR} sind die Grenzen für die Bestimmung der Extremwerte. Gefundene Extremwerte werden dann durch den Mittelwert der jeweiligen Zahlenfolge ersetzt (Cousineau und Chartier, 2010).

4.3 Arbeitsschritte zur Sensorkalibrierung (AP6)

Im Projekt wurden 2 Sensoren eingesetzt, um die P-Akkumulation in den Hefen verfolgen zu können: der Schallsensor Sonatec misst die Schallgeschwindigkeit in der zu untersuchenden Lösung und der Dichtesensor Rhotec die Dichte der Flüssigkeit. Im Schallsensor gibt es zwei gegenüberliegende Komponenten, den Sender und den Empfänger, die in einer definierten Entfernung voneinander positioniert sind. Die Schallimpulse des Senders brauchen je nach Medium unterschiedlich lange, um den Empfänger zu erreichen. Daraus lässt sich auf die Konzentration der im Medium gelösten Substanzen

schließen. Der Dichtesensor ist ein Biegeschwinger, d.h. eine lange, dünne Kapillare, die durch ein Piezzo-Element zur Schwingung angeregt wird. Je nach Dichte der durchströmenden Lösung ändert sich die Amplitude der Schwingung.

Sowohl die Dichte, als auch die Schallgeschwindigkeit sind temperaturabhängige Größen, die, eine Temperaturkompensation vorausgesetzt, schon auf kleinste Änderungen in der Konzentration der für die Kalibrierung des Gerätes genutzten Stoffe reagiert (Dichtesensor: 0-3000 kg/m³, Abweichung: ± 0,1 kg/m³; Schallsensor: 400 - 3.000 m/s, Abweichung: ± 0,05 m/s).

Für die Temperaturkompensation wurden Rücklaufschlamm Proben aus der Kläranlage in Hanau (270.000 EW) besorgt, da der Versand vom UFZ zu lange dauert und die Proben möglichst frisch vermessen werden sollten. Bei den Proben wurden dann mit einem Labormessgerät Dichte und Schall aufgezeichnet. Die Temperatur der Probe wurde dabei in 5°C Schritten von 5 auf 30°C erhöht. In einem zweiten Ansatz wurde den Schlammproben des Rücklaufschlamm eine definierte Menge an KH₂PO₄ zugegeben, um eine Phosphorkonzentration von 1 kg/m³ zu erhalten. Diese Probe wurde analog zu den Proben ohne Phosphorzusatz vermessen. Es wurden jeweils 3 Proben nacheinander vermessen und die Mittelwerte gebildet.

Danach wurde für Rücklaufschlamm und Rücklaufschlamm mit P-Zugabe eine Temperaturkompensation auf Dichte (20°C, Gleichung 27) bzw. Schall (20°C, Gleichung 28) erstellt. Dabei wurde ein Berechnungspolynom 2. Grades benutzt.

$$\text{Gleichung (27)} \quad D_{20} = KA + KB * dt + KC * dr$$

$$\text{Gleichung (28)} \quad S_{20} = KA + KB * dt + KC * dr$$

D₂₀/S₂₀ - temperaturkompensierte Dichte/Schall

KA/B/C - Polynomkonstante A/B/C

dt - aktuelle Temperatur minus Referenztemperatur

dr - aktueller Dichte-/Schallwert minus Referenzwert Dichte/Schall

Die Verringerung des Temperatureinflusses ist in Abbildung 7 gezeigt.

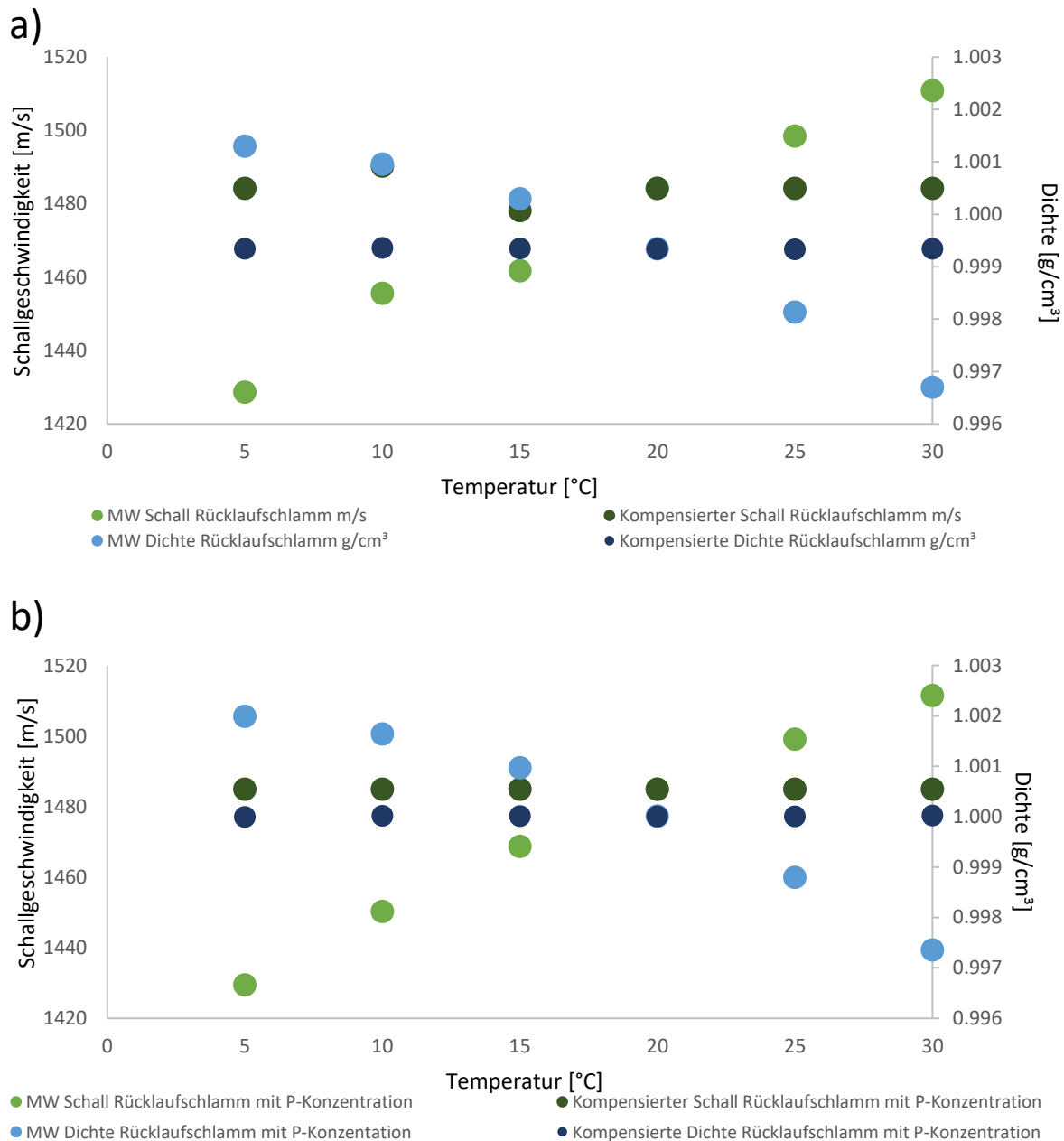


Abbildung 7. Einfluss der Temperaturkompensation auf Dichte und Schallgeschwindigkeit auf die Rücklaufschlammprobe (a) und Rücklaufschlammprobe mit P-Zusatz (b)

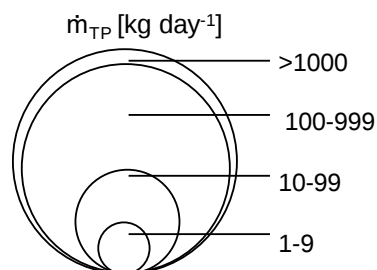
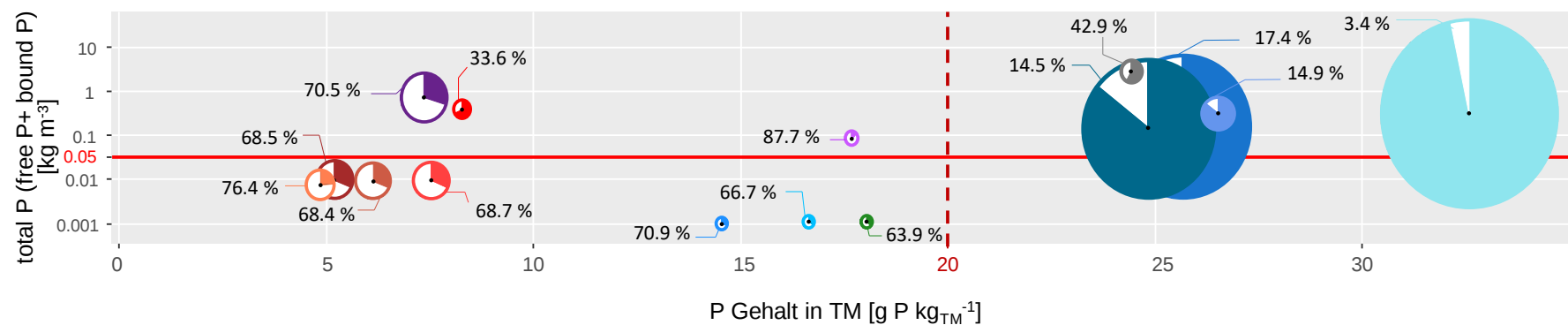
Im Ergebnis der Kalibrierung kann festgestellt werden, dass mit der entwickelten Temperaturkompensation eine temperaturunabhängige Auswertung der Messwerte möglich ist. Zudem zeigt sich, dass die Zugabe von einer definierten Konzentration von KH_2PO_4 (1kg/m^3) hauptsächlich die Dichte verändert ($0,9995\text{ g/cm}^3$ ohne P-Zugabe, $1,000\text{ g/cm}^3$ mit P-Zugabe).

5. Resultate

5.1. Analyse der Phosphorbilanzen (AP13-AP14)

Im Zwischenbericht wurden bereits erwähnt, dass sich gegenüber der Zeit der Antragsstellung Veränderungen im Betrieb der Kläranlage ergeben haben, die Einfluss auf die Verfügbarkeit von Phosphor haben. So wurde eine automatische Messung von Phosphor vor dem Ablauf eingerichtet, die bei Bedarf für eine Zudosierung von Fällmittel sorgt. Die kontinuierliche Regelung des Phosphors sorgt dafür, dass zurzeit nur rund die Hälfte des zugeführten Phosphors biologisch eliminiert wird (Anhang 2: STOTEN Figure SI 3) anstelle der 90% in 2013/2014. So ist derzeit der Anteil des im Belebtschlamm gebundenen Phosphors mit $\sim 2,5\%$ (25 g P/kg TM) niedriger, als für Anlagen mit biologischer P-Elimination in der Literatur beschrieben wird (4 - 5% bzw. 40-50 g P /kg TM; Blackall et al., 2002). Für den Zeitraum des Projektes ist nun die beprobte Kläranlage also eher einer konventionellen Anlage mit chemisch-biologischer P-Elimination zuzuordnen, die die Mehrheit der Anlagen in Deutschland darstellt. Daher wurden die ursprünglich für AP7 (P-Rückgewinnung aus chemischer Fällung) geplanten Arbeiten den APs 8-11 zugeordnet. Trotz der eingeführten chemischen Fällung ist in der Abwasseranlage i) genügend Phosphor für eine erfolgreiche Rückgewinnung von Phosphor aus Schlämmen und Wässern nach wie vor möglich, und sind ii) die Phosphorwerte im Klärschlamm über den in der Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) zulässigen Werten für eine Entsorgung. Die Phosphorwerte im Abfluss sind dabei konstant im Rahmen der aktuell gesetzlich vorgeschriebenen Werte (AbwV, 2020). Die zu entsorgenden Klärschlämme (Probenpunkt 15) der Anlage selbst müssten jedoch in Zukunft mit einer Technologie behandelt werden, die den Phosphorgehalt senkt. Die Phosphorwerte von allen Schlämmen und Wässern sind in Abbildung 8 dargestellt. Hier werden die einzelnen Prozessströme im Hinblick auf ihren Gehalt an total, free und bound P verglichen und die täglich verfügbare Masse an total P angegeben.

On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage



P Arten

- bound P
- free P

Probenahmepunkte

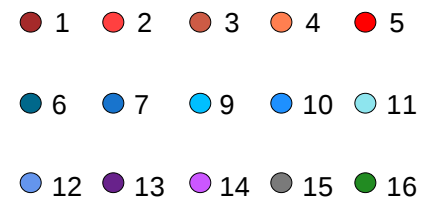


Abbildung 8. P-Verteilung innerhalb der Kläranlage. Alle 15 Probenahmepunkte (der Fällungsschacht, Nr. 8, wurde bei dieser Analyse nicht mit einbezogen) zeigen zusätzlich zum total P-Gehalt und P-Gehalt in Trockenmasse (TM) die Masse an P (Größe des Tortendiagramms) sowie die Verteilung zwischen free and bound P (Tortendiagramm). Der Anteil an free P wird zusätzlich durch eine Prozentangabe hervorgehoben. Die ökonomisch wichtige Grenze von 0,05 kg P/m³ ist als horizontale rote Linie dargestellt, die für die Entsorgung wichtige Grenze von 20 g P/kg TM als vertikale rote Linie. 1 Zulauf, 2 Sandfang (Start), 3.Sandfang (Ende), 4.Vorklärbecken mit Primärschlammabtrennung (5), 6 Belebungsbecken1, 7 Belebungsbecken2, 9 Nachklärbecken1, 10 Nachklärbecken2, 11 Rücklaufschlamm, 12 Überschussschlamm, 13 Faulschlamm, 14 Trübwasser, 15 entwässerter Klärschlamm, 16 Ablauf.

Die mit Abstand größte Menge an P ist im Rücklaufschlamm (Nr. 11, 1187 kg/d) sowie in den Belebungsbecken (Nr. 6 und 7, 550 und 608 kg/d) zu finden. Dem folgen der Faulschlamm (Nr. 13, 55 kg/d) und der Überschussschlamm (Nr. 12, 37 kg/d). Aufgrund des großen Volumens im Zulauf ($\sim 4500 \text{ m}^3/\text{d}$) sind auch die Werte für Zulauf (Nr. 1, 42 kg/d), Sandfang (Nr. 2 und 3, 41 kg/d) und Vorklärbecken (Nr. 4, 33 kg/d) hoch. Die Werte für den P-Gehalt in Trockenmasse sind erwartungsgemäß hoch für die Belebtschlämme und daraus resultierende Prozessströme Rücklauf- und Überschussschlamm (24-32 g P/kg TM), denn hier wird P entweder biologisch oder durch Fällung in der Schlammmatrix gebunden. Überraschenderweise liegen trotz niedriger total P-Werte ($0,001\text{-}0,0011 \text{ kg/m}^3$) auch der Ablauf (Nr. 16) und die beiden Nachklärbecken (Nr. 9 und 10) zwischen 10 und 20 g P/kg TM. Dies liegt an der extrem geringen TM in diesen Strömen ($0,017\text{-}0,02 \text{ kg/m}^3$, vgl. Zulauf: $0,91 \text{ kg/m}^3$). Ähnlich ist es beim Trübwasser (Nr. 14). Der Gehalt an total P ist hier zwar viel höher ($0,086 \text{ kg/m}^3$), aber durch die geringe TM ($0,93 \text{ kg/m}^3$) liegt auch hier der P-Gehalt in TM hoch ($17,6 \text{ gP/kg TM}$).

Es gibt insgesamt 8 Probenahmepunkte, die über der ökonomisch wichtigen Grenze von $0,05 \text{ kg P/m}^3$ liegen. Das sind die beiden Belebungsbecken (Nr. 6,7), Rücklauf -und Überschussschlamm (Nr. 11,12), Primär- und Faulschlamm (Nr. 2, 13), Trübwasser (Nr. 14) und der entwässerte Klärschlamm (Nr. 15). Obwohl Nr. 6 und 7 am vielversprechendsten sind, ist ihre Eignung für die Rückgewinnung fraglich, da es zentrale Prozesse der Kläranlage sind und als solche nicht beeinflusst werden sollten. Die restlichen Ströme (Trübwasser, Rücklauf- und Überschussschlamm, Faulschlamm und entwässerter Klärschlamm) mit Ausnahme von Nr. 2 (hygienische Gründe) sind für eine Rückgewinnung gut nutzbar. Diese Schlämme und Wässer werden daher im Modul (siehe Daten weiter unten) eingesetzt. Der hohe Gehalt an free P in Nr. 13 (70,5%) und 14 (87,7%) zeigt zudem, dass trotz chemischer Fällung eine Rücklösung von Phosphor unter anaeroben Bedingungen stattfindet. Wie die mikrobiologischen Gemeinschaften darauf reagieren, wird im Folgenden beschrieben.

Fazit: Die Analyse der Phosphorbilanzen konnte erfolgreich durchgeführt werden. Für eine Rückgewinnung von Phosphor wurden die Schlämme und Wässer Trübwasser, Rücklauf- und Überschussschlamm, Faulschlamm und entwässerter Klärschlamm auf Grund ihrer hohen Phosphorwerte empfohlen. Die Arbeitspakete 13 und 14 (P-Bilanzen und Bioinformatische Analyse) sind damit abgeschlossen.

5.2. Stabiler Betrieb der Anlage (AP 12)

Im Zwischenbericht wurden bereits die überraschend stabilen mikrobiologischen Gemeinschaften der Kläranlage beschrieben (Zwischenbericht, S. 15-18). Weitere Ausführungen dazu sind in der Anlage 2: STOTEN (Abb. 3 und zugehörige SIs) zu finden. Im Ergebnis konnte festgestellt, dass die mikrobiellen Gemeinschaften über Jahre hinweg zwischen den 16 Probenahmepunkten (Becken und Reaktoren) unterschiedliche Zusammensetzungen hatten, jedoch innerhalb der meisten Becken und Reaktoren unverändert in ihrer Struktur blieben (Abbildung 9). Dabei gab es Ähnlichkeiten in der Struktur zwischen den Probenahmepunkten 1-5 (Zulauf bis Vorklärbecken mit Primärschlammabtrennung, DTC: $0,16\text{-}0,2$ (DTC: *distance to centroid* – Abstand zum Schwerpunkt = Varianz der Gemeinschaft)) sowie zwischen den Probenahmepunkten 6,7 und 8 (DTC: $0,08\text{-}0,09$) und 10, 11 (Belebtschlammbecken sowie Überschuss- und Rücklaufschlamm, DTC: $0,06\text{-}0,11$). Die meisten Variationen gab es in den Nachklärbecken (9, 10, DTC: $0,31\text{-}0,33$), die eine deutlich geringere Zellzahl besaßen und damit mehr dem Wetter ausgesetzt waren

(Beprobung an der Oberfläche), den Trübwasser (DTC: 0,38) und dem Ablauf (DTC: 0,34). Insgesamt kann jedoch festgestellt werden, dass die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaften in den Becken und Reaktoren unerwartet stabil war und daher nicht befürchtet werden muss, dass eine moderate Phosphorrückgewinnung aus den oben genannten Schlämmen und Wässern zu einer unerwünschten Beeinflussung der Funktionen der Mikroorganismen in einer Abwasseranlage führen könnte.

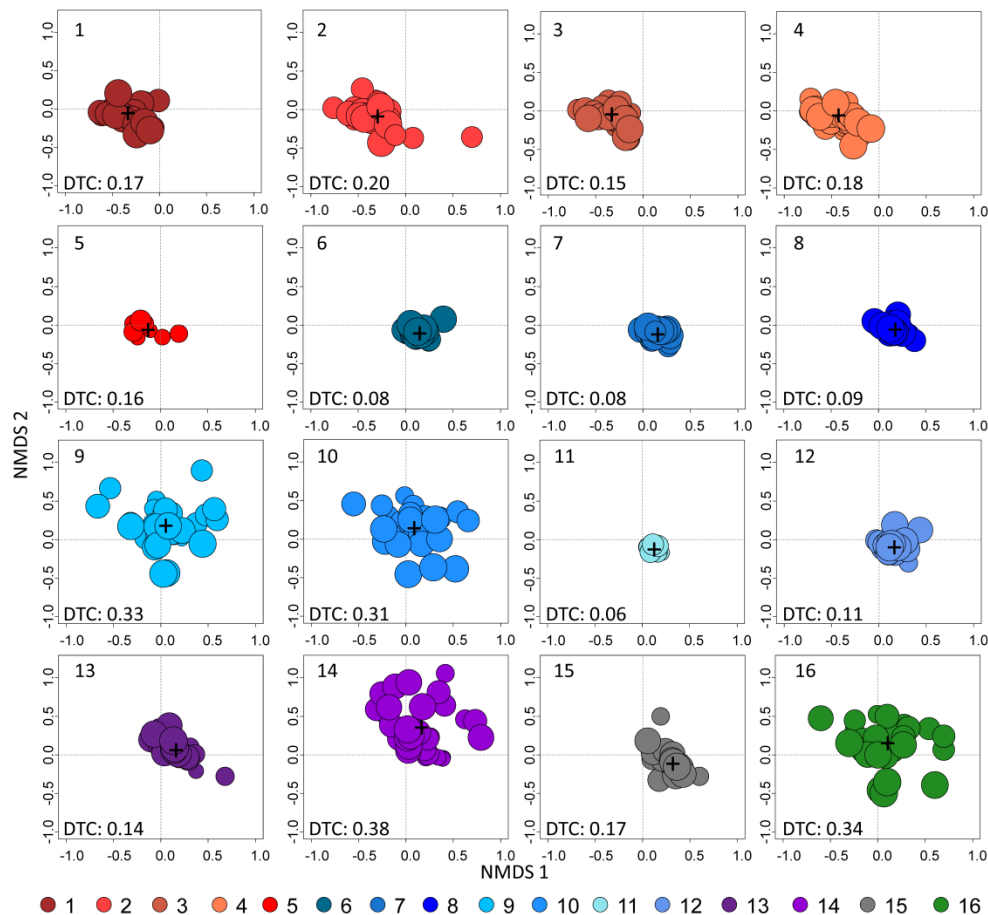


Abbildung 9. NMDs-Grafiken mit den Veränderungen in den 16 mikrobiologischen Gemeinschaften über 748 Tage. Die einzelnen Punkte stellen jeweils einen Probenahmetag dar, mit der kleinsten Punktgröße als Tag 1. Abstände zwischen den Punkten stellen eine Veränderung in der Gemeinschaft dar (Berechnung über die Bray-Curtis Unähnlichkeit). Die jeweiligen Schwerpunkte des NMDs sind mit einem schwarzen Kreuz markiert. Der gemittelte Abstand der Punkte zu den jeweiligen Kreuz ist als DTC-Wert angegeben (DTC: *distance to centroid* – Abstand zum Schwerpunkt). 1 Zulauf, 2 Sandfang (Start), 3 Sandfang (Ende), 4 Vorklärbecken mit Primärschlammabtrennung, 5 Belebungsbecken1, 6 Belebungsbecken2, 7 Fällungsschacht, 9 Nachklärbecken1, 10 Nachklärbecken2, 11 Rücklaufschlamm, 12 Überschussschlamm, 13 Faulschlamm, 14 Trübwasser, 15 entwässerter Klärschlamm, 16 Ablauf.

Die zellbasierten Informationen aus der zytometrischen Analyse wurden weiterhin zusammen mit den Daten der biologisch-chemischen P-Elimination und den P-Konzentrationen der einzelnen Schlämme und Wässer bioinformatisch analysiert. Dabei wurden alle Probenahmetage in 2 Gruppen eingeteilt: Tage mit hauptsächlich biologischer P-Elimination (über 32,28 kg P/d) und Tage mit hauptsächlich chemischer Fällung (über 15,65 kg P/d). Für beide Gruppen wurde untersucht wie stark die Mikroorganismen mit den P-Konzentrationen interagieren (Abbildung 10, Korrelationsanalyse, Punkt 4.1.6).

Bei beiden Gruppen machen die Korrelationen mit dem free P den größten Anteil an negativen Korrelationen mit den Abundanzen der mikrobiologischen Gemeinschaften aus. Das bedeutet, dass free P-Konzentrationen hier abnehmen, entweder durch Aufnahme von freiem Phosphor durch Mikroorganismen oder durch Bindung von freiem Phosphor durch chemische Fällungsmittel. Den größten Anteil an der biologischen P-Elimination haben erwartungsgemäß die Belebungsbecken (6 und 7) sowie der entwässerte Klärschlamm (15). Durch die hohe Dosierung des Fällmittels kommt es zudem zu einem Übertrag des chemisch gefällten Phosphors vom Fällschacht (8) über den Rücklaufschlamm (11) zurück in die Belebungsbecken, was sich an den negativen Korrelationen (hellgrau) zeigt. Der chemisch gefällte Phosphor kann nicht durch die Mikroorganismen aufgenommen werden und verbleibt in der Anlage bis zur seiner Entnahme über den Klärschlamm. Die positiven Korrelationen mit dem biologischen bound P sind daher an Tagen mit überwiegender biologischer Elimination deutlich stärker ausgeprägt (0,095 Korrelationen pro Tag und Gate), als an Tagen mit überwiegender chemischer Fällung (0,05 Korrelationen pro Tag und Gate).

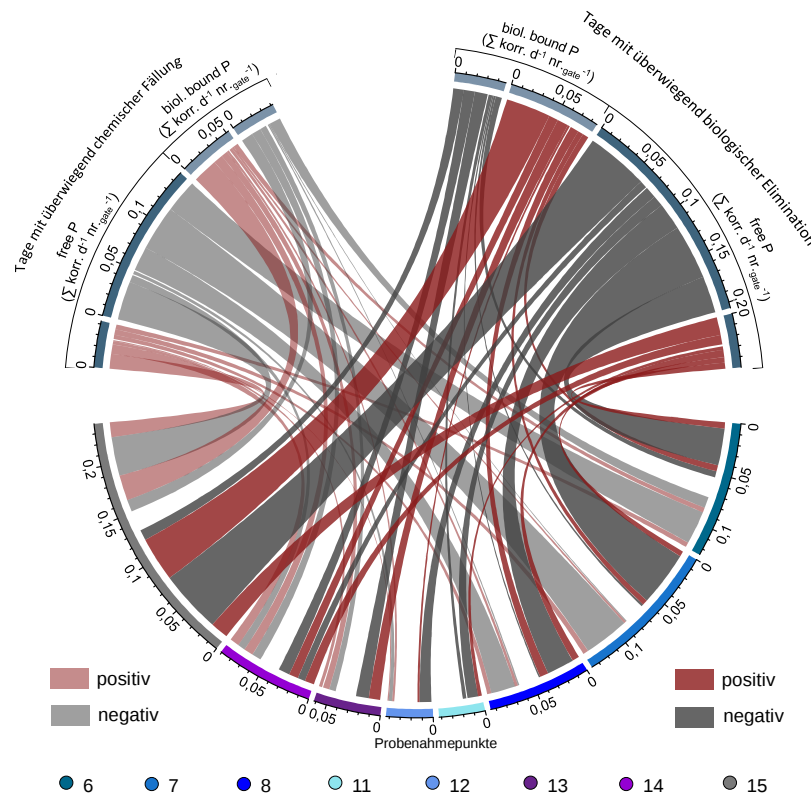


Abbildung 10. Einfluss der P-Fällung auf die Mikroorganismen. Für die Probenahmepunkte mit P-Konzentrationen über der Grenze von 0,05 kg P/m³ wurde die Anzahl der Korrelationen von Subcommunities (nr. gate) bezogen auf die Art des P (free P und biologisches bound P) und der Probenahmetage (d) berechnet. Tage mit vorwiegend chemischer Fällung (über 15,65 kg P/d) sind links dargestellt und Tage mit überwiegender biologischer P-Elimination (über 32,28 kg P/d) rechts. Positive Korrelationen sind rot, und negative Korrelationen grau markiert. Probenahmepunkte: 6 Belebungsbecken1, 7 Belebungsbecken2, 8 Fällungsschacht, 11 Rücklaufschlamm, 12 Überschussschlamm, 13 Faulschlamm, 14 Trübwasser, 15 entwässerter Klärschlamm

Eine Hemmung der biologischen P-Elimination durch Fällmittel tritt zwar erst ab einer Eisenkonzentration von 40 g/m³ auf (Yilmaz et al., 2017), aber es kann vermutet werden, dass die wesentlich schnellere chemische Fällung die Verfügbarkeit des free P für die Mikroorganismen einschränkt (de Haas et al. 2001) und damit Tage mit überwiegender chemischer Fällung selbstverstärkend wirken. Da die biologische P-

Elimination in beiden Gruppen trotzdem stattfindet, gibt es keine Anzeichen für eine langfristige Beeinträchtigung der biologischen Funktion. Dies ist auch ein wichtiger Punkt für die Experimente in der Pilotanlage. Eine verringerte P-Freisetzung aus dem Belebtschlamm kann abhängig vom Tag der Beprobung erwartet werden, aber der negative Einfluss des Fällmittels sollte auf die verringerte Rücklösung beschränkt sein.

Bei Betrachtung aller Probenahmetage ist der Anteil der Korrelationen mit free P (positive und negative Korrelationen) ebenfalls deutlich höher als beim bound P (Abbildung 11) und zeigt sich in allen Probenahmepunkten. Dies unterstreicht die Bedeutung von free P für die Mikroorganismen.

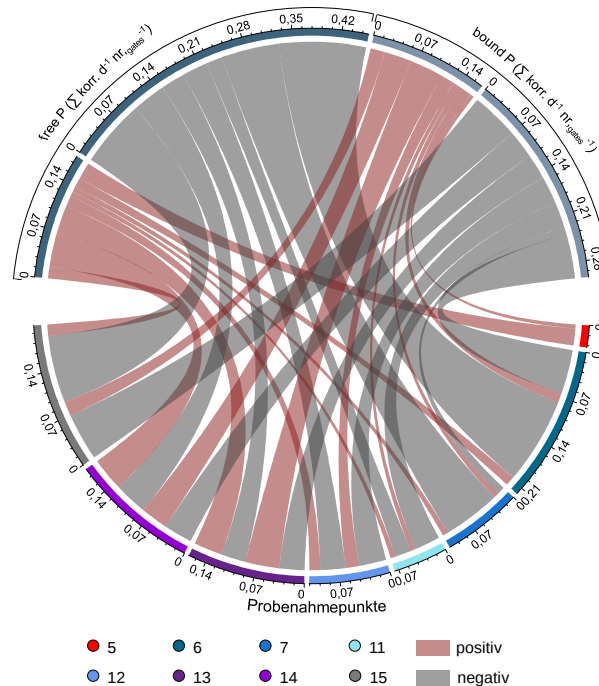


Abbildung 11. Interaktion der Mikroorganismen mit free und bound P. Für die Probenahmepunkte mit P-Konzentrationen über der Grenze von $0,05 \text{ kg P/m}^3$ wurde die Anzahl der Korrelationen von Subcommunities (nr. gate) bezogen auf die Art des P (free P und bound P) und der einbezogenen Probenahmetage (d) berechnet. Positive Korrelationen sind rot, und negative Korrelationen grau markiert. Probenahmepunkte: 5 Primärschlamm, 6 Belebungsbecken1, 7 Belebungsbecken2, 11 Rücklaufschlamm, 12 Überschussschlamm, 13 Faulschlamm, 14 Trübwasser, 15 entwässerter Klärschlamm

Auch bound P ist im Anlagensystem nicht inert sondern ständigen Umwandlungen unterworfen. Biologisches bound P wird von den Mikroorganismen in minutenschnell auf- und abgebaut. Es findet daher in allen Probenahmepunkten eine Interaktion von Mikroorganismen mit P statt. Selbst im entwässerten Klärschlamm kommen die Umwandlungsprozesse nicht zum Erliegen, sondern setzen sich fort, was durch die hohe Anzahl an positiven und negativen Korrelationen deutlich wird. Die negativen Korrelationen der Mikroorganismen mit freiem Phosphor ist dabei besonders hoch, was für eine Aufnahme von freiem Phosphor in Mikroorganismen spricht.

Fazit: Obwohl die biologische P-Elimination in der Kläranlage derzeit gering ausfällt als bei der Antragsstellung angenommen, ist eine P-Rückgewinnung aus den Schlämmen und Wässern der Anlage möglich. Für die Mikroorganismen bedeutet der Einsatz von Fällmitteln vor allem bei niedrigeren free P Konzentrationen eine Konkurrenzsituation und die Korrelationsanalysen weisen darauf hin, dass sie

weniger freien Phosphor in den Zellen binden. Die biologische P-Elimination ist jedoch unter den gegebenen Bedingungen in allen untersuchten Prozessströmen nachzuweisen. Daher können auch Prozessströme zur biologischen P-Elimination eingesetzt werden, die einer chemischen P-Fällung ausgesetzt sind. Allerdings verringert eine hohe chemische Phosphorfällungsrate die Verfügbarkeit von freiem Phosphor in den Prozessströmen und erniedrigt damit die Quantität des freien Phosphors, welches durch ein nachfolgend installiertes P-Rückgewinnungs-Modul effizient in Brauhefen angereichert werden könnte. Das Arbeitspaket 12 ist damit erfolgreich abgeschlossen.

5.3 Phosphor-Rückgewinnung aus Prozessschlamm und Prozesswässern (AP7-AP11)

5.3.1 Modulbetrieb im Tank 1

Wie unter Punkt 5.1 bereits beschrieben, eignen sich 4 Probenahmepunkte für eine Phosphorrückgewinnung: Überschussschlamm (bzw. Rücklaufschlamm), Faulschlamm, Trübwasser und entwässerter Klärschlamm. Da Überschuss- und Rücklaufschlamm den gleichen Ursprung haben (abgesetzter Belebtschlamm des Nachklärbeckens) werden sie hier als identisch betrachtet. Die Daten hinsichtlich Phosphorgehalt und mikrobiologischer Gemeinschaft (Anhang 2: STOTEN) zu diesen beiden Schlammern bestätigen diese Annahme. Bei dem Modulbetrieb Tank 1 stand die Frage nach der Rücklösbarkeit des free P aus den Prozessschlammern und Prozesswässern im Vordergrund. Nur freier Phosphor kann durch die Hefen aufgenommen werden. Dafür wurden je Prozessschlamm oder -wasser 0,8 m³ in den Tank 1 eingefüllt und die free P Konzentration verfolgt (Tabelle 1). Nachfolgende Versuche sind jeweils mit einem Aufnahmeversuch in Tank 2 gekoppelt. Daten zu diesen Hauptversuchen und den Vorversuchen sind in Anhang 4 unter den Tabellenblättern „Tank 1 und 2 - Vorversuche“ und „Tank 1 und 2 – Hauptversuche“ zu finden. Experimente aus dem Zwischenbericht werden hier nicht mehr berücksichtigt, da die Rückgewinnungsprozedur optimiert wurde und daher nicht mehr vergleichbar ist.

Tabelle 1. Behandlung der untersuchten Schlämme und Wässer im Tank 1. Im Überschussschlamm wurde auf den Einsatz eines Rührers verzichtet. (*): kein Rührereinsatz während der Rücklösung, Betriebsstörungen: ⁰¹: Vorklärung außer Betrieb, das komplette Abwasser wird in den Belebungsbecken behandelt. ⁰²: Nachwirkungen bezüglich Absatzverhalten von ⁰¹, ⁰³: Zentrifugenproblem, ein Teil des Überschussschlammes ist mit dem Trübwasser vermischt

	Füllvolumen Tank 1	Zusatz zu Tank 1	Befüllungs dauer	aktive Freisetzung von free P (Rührereinsatz)	Gesamtzeit in Tank 1
	m ³		h	h	h
Trübwasser 1	0.8		0.25	2	69
Trübwasser 2 ⁰³	0.8		0.25	1	1
Faulschlamm 1	0.8		0.25	2	22.5
Faulschlamm 2	0.8		0.25	2	24.5
Klärschlamm 1	0.8	160 kg entwässerter Klärschlamm, auffüllen mit Brauchwasser auf 0.8 m ³	2	2	24
Klärschlamm 2	0.8	160 kg entwässerter Klärschlamm, auffüllen mit Brauchwasser auf 0.8 m ³	2	2	24
Überschussschlamm 1 ⁰¹	0.8		0.25	51*	51
Überschussschlamm 2 ⁰²	0.8		0.25	48*	48

Die aktive Rücklösedauer war für alle Schlämme/Wässer gleich, mit Ausnahme des Überschussschlammes. Nach der aktiven Phase der Rücklösung (außer beim Überschussschlamm mit Rührer) wurden die Wässer und Schlämme insgesamt 24-69 h im Tank 1 inkubiert, um auf weitere Veränderungen im free P-Gehalt zu testen („passive Rücklösung“).

Wichtigster Parameter der Rücklösung ist die free P Konzentration. Um abschätzen zu können, ab wann sich eine Rückgewinnung lohnt, wurde der von Cornel und Schaum (Cornel und Schaum, 2009) angegebene Grenzwert für eine ökonomische Rückgewinnung von $0,05 \text{ kg/m}^3$ total P auf die free P Konzentration in diesem Projekt übertragen und damit sogar höhere Grenzwerte vorgegeben.

5.3.1.1. Überschussschlamm in Tank 1

Die Durchmischung des Tanks 1 durch langsames Rühren erfolgte während der Befüllung und wurde dann für die Dauer des Versuches ausgesetzt. Die Rücklösung von freiem P aus den Mikroorganismen des Überschussschlammes in den Tank 1 erfolgte bis zum Erreichen der Grenze von $0,05 \text{ kg free P/m}^3$ über einen Zeitraum von bis zu 51 Stunden (Abbildung 12). Zwei nacheinander erfolgende Versuchsansätze wurden durchgeführt. Die Anfangskonzentration an free P von $0,019$ (Überschussschlamm 1, 01.12.2020) bzw. $0,009 \text{ kg/m}^3$ (Überschussschlamm 2, 07.12.2020) stiegen in den ersten 4 Stunden um das 3fache an. Danach wurde die Freisetzung von freiem Phosphor langsamer. Dennoch wurde ab 4 h bzw. schließlich nach 50 Stunden die free P Grenze für die ökonomische Rückgewinnung überschritten (rote Linie). Die free P Konzentration von $0,05 \text{ kg/m}^3$ (Überschussschlamm 1) wurde nach 4 h erreicht und über 51 Stunden Inkubation im Tank 1 gehalten und bei Überschussschlamm 2 wurden $0,086 \text{ kg/m}^3$ nach 48 Stunden erreicht. Bei einem total P Wert von $0,71 \text{ kg/m}^3$ (Überschussschlamm 1) bzw. $0,228 \text{ kg/m}^3$ (Überschussschlamm 2) sind dies 7,16 bzw. 37,72% des im Schlamm vorhandenen Phosphors (Tabelle 2). Alle Werte sind in Anhang 4 unter dem Tabellenblatt „Tank 1 und 2 - Hauptversuche“ zu finden.

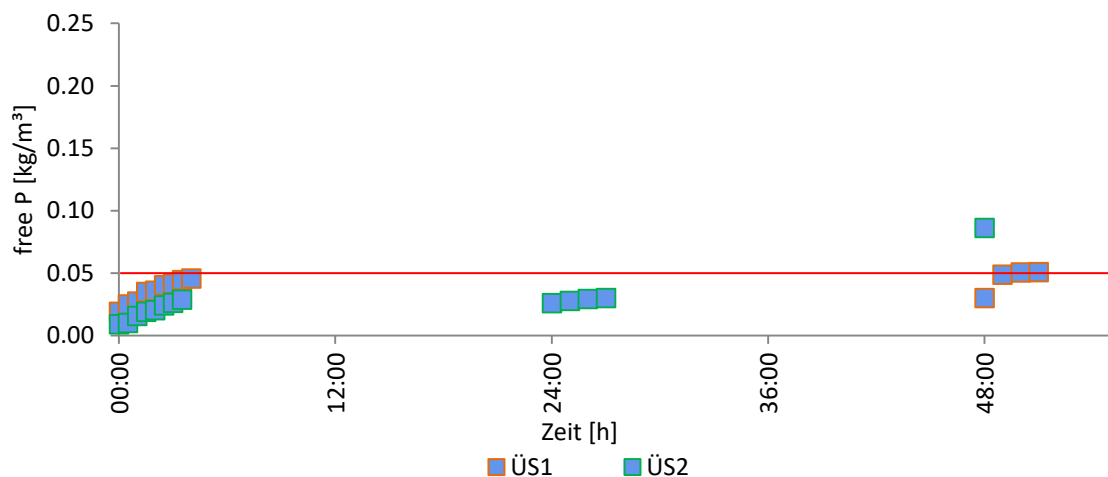


Abbildung 12. Freisetzung von free P aus dem Überschussschlamm (ÜS). Die rote Linie markiert die an free P adaptierte Grenze für die ökonomische Rückgewinnung nach Cornel und Schaum 2009. Nach 48 h ist diese Grenze erreicht und damit eine nachfolgende Phosphorrückgewinnung wirtschaftlich.

Der gravierende Unterschied zwischen den total P-Werten zwischen ÜS1 und ÜS2 kann an der Fahrweise der Kläranlage zum Zeitpunkt dieses Versuches liegen. Betriebsbedingt war zu der Zeit vom Versuch 1 für Überschussschlamm 1 die Vorklärung außer Betrieb, was zu einer sehr hohen Belastung ($0,71 \text{ kg total P/m}^3$)

im Vergleich zu einem mittleren Wert von $0,31 \text{ kg total P/m}^3$ im Zeitraum von 748 Tagen (Anhang 2, STOTEN, SI Table 3)) der Belebtschlämme führte. Diese hohe Belastung wurde durch eine im Vergleich zu Versuch 2 erhöhte Fällung kompensiert. Die Verfügbarkeit an free P war dadurch bei beide Versuche nahezu gleich. Eine Woche später (Überschussschlamm 2) war die Belastung wieder im normalen Rahmen. Da nach rund 48 Stunden die free P Grenze für beide Versuche die ökonomische Rückgewinnung erreicht wurde, wird diese Inkubationszeit für den Überschussschlamm empfohlen, allerdings sollte auf eine kürzere Zeit nochmals getestet werden.

5.3.1.2 Trübwasser im Tank 1

Bei dem Substrat Trübwasser liegt die free P Konzentration in der Regel bereits über der Grenze von $0,05 \text{ kg/m}^3$ ($0,075 \text{ kg/m}^3 \pm 0,044$; Anhang 2: STOTEN SI Table 3). In den beiden in Abbildung 13 dargestellten Versuchen lag die free P Konzentration bereits beim Start der Freisetzung knapp unter ($0,042 \text{ kg/m}^3$, Trübwasser 1, 17.11.2020) bzw. über ($0,053 \text{ kg/m}^3$, Trübwasser 2, 30.11.2020). Wie zu erwarten war, wurde aus dem Trübwasser während der aktiven Inkubation in Tank 1 (1-2h, Rührwerk an) kaum weiteres free P freigesetzt und auch während der passiven Inkubation (Trübwasser 1, 69 h, Tabelle 1) erfolgte keine weitere nennenswerte Zunahme an free P. Die Endkonzentrationen von $0,055$ (Trübwasser 1, siehe Tabelle 6) und $0,054$ (Trübwasser 2, siehe Tabelle 6) liegen beide über der free P Grenze für die ökonomische Rückgewinnung. Da kaum eine Rücklösung aus dem Trübwasser erfolgt, wird zu einer direkten Verwendung in Tank 2 geraten, sofern die free P Konzentration über $0,05 \text{ kg/m}^3$ liegt.

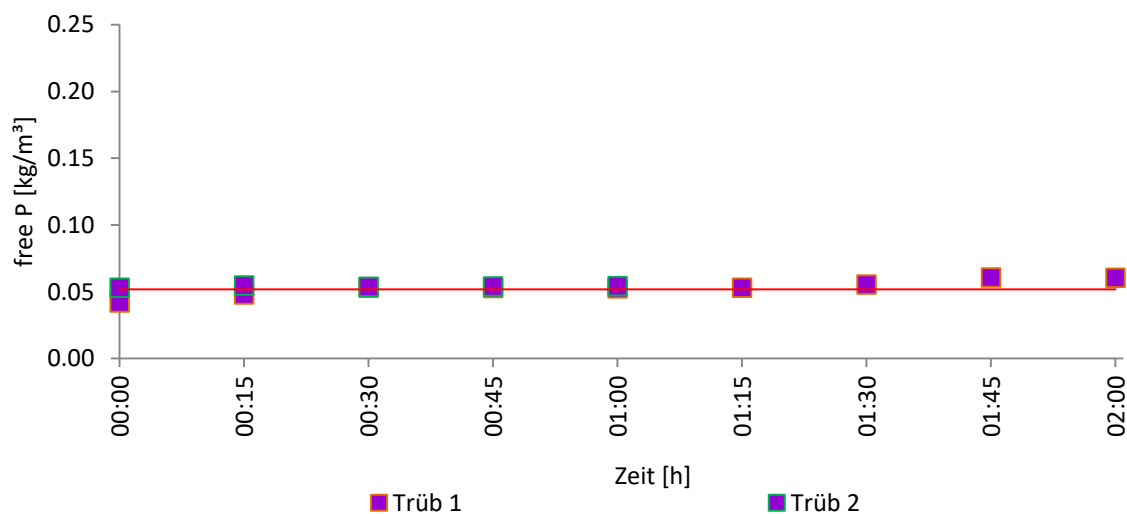


Abbildung 13. Freisetzung von free P aus Trübwasser (Trüb). Die rote Linie markiert die an free P adaptierte Grenze für die ökonomische Rückgewinnung nach Cornel und Schaum 2009. Diese Grenze wird durch das Trübwasser direkt erreicht und damit eine nachfolgende Phosphorrückgewinnung ist damit wirtschaftlich.

5.3.1.3. Faulschlamm im Tank 1

Bei dem Substrat Faulschlamm liegt die free P Konzentration mit $0,51 \pm 0,13 \text{ kg/m}^3$ in der Regel bereits über der Grenze von $0,05 \text{ kg/m}^3$ (Anhang 2: STOTEN SI Table 3). Um zu testen, ob sich noch mehr free P durch Nutzung eines Rührers rücklösen lässt, wurde auch der Faulschlamm in Tank 1 getestet (Abbildung 14). Obwohl also bereits nach dem Einfüllen in Tank 1 hohe free P Konzentrationen von $0,119 \text{ kg/m}^3$ (Faulschlamm 1, 10.12.2020) und $0,126 \text{ kg/m}^3$ (Faulschlamm 2, 20.01.2021) vorlagen, wurden nach den 2

Stunden aktiver Rücklösung 0.180 kg/m^3 und 0.219 kg/m^3 free P gemessen (Anhang 4, „Tank1 und 2 - Hauptversuche). Dieser hohe Wert wird jedoch in der passiven Inkubation nicht beibehalten. Nach 24 Stunden (zum Start der Versuche in Tank 2) liegt die free P Konzentration bei 0.108 (Faulschlamm 1) bzw. 0.107 (Faulschlamm 2) kg/m^3 (siehe Tabelle 6). Da es nicht zu einer Absetzung der Biomasse während der passiven Phase kommt, wird zu einer Rücklösungszeit von 2 Stunden geraten.

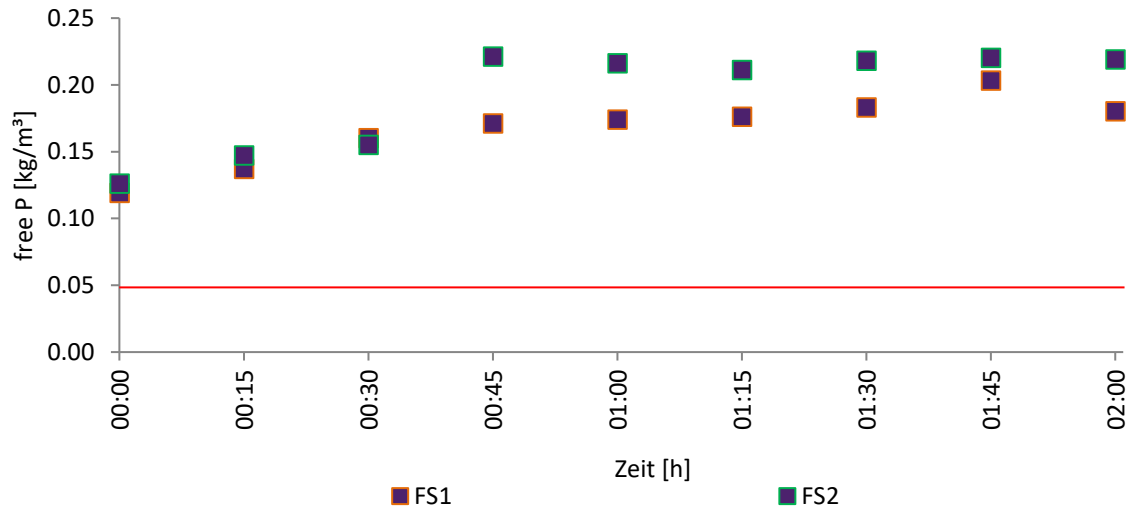


Abbildung 14. Freisetzung von free P aus Faulschlamm (FS). Die rote Linie markiert die an free P adaptierte Grenze für die ökonomische Rückgewinnung nach Cornel und Schaum 2009. Diese Grenze wird direkt durch den Faulschlamm erreicht und damit ist eine nachfolgende Phosphorrückgewinnung wirtschaftlich.

5.3.1.4. Klärschlamm im Tank 1

Das free P aus dem entwässerten Klärschlamm (KS) muss zunächst zurückgelöst werden. Dafür wurden mit einer Schaufel aus den Klärschlammcontainern (Abbildung 15) Klärschlamm entnommen, in einem 10l-Eimer abgewogen und in Tank 1 gefüllt. Insgesamt wurden 160 kg in den Tank 1 gefüllt und mit Brauchwasser auf $0,8 \text{ m}^3$ aufgefüllt. Während des Einfüllens wurde Tank 1 intensiv gerührt, um eine Absetzung des Klärschlamms zu vermeiden. Abbildung 15 verdeutlicht die unterschiedliche Konsistenz des Klärschlamms zu unterschiedlichen Zeiten. Frischer Klärschlamm ist in der Regel trocken und krümelig (Abbildung 15 links), während älterer Klärschlamm zur Verklumpung neigt und wesentlich mehr Feuchtigkeit enthält (Abbildung 15, rechts).



Abbildung 15. Entwässerter Klärschlamm (22.09. 2020) in den Containern, links: frisch, rechts: gealtert.

Vor Befüllen des Tank 1 mit Klärschlamms wurden stets 250 l Brauchwasser vorgelegt, damit sich der Klärschlamm besser lösen lässt. Der free P Gehalt des Brauchwassers lag stets unter $0,001 \text{ kg/m}^3$ (MW $0,0008 \text{ kg/m}^3$, $\pm 0,00033$) und der total P Gehalt unter $0,0013 \text{ kg/m}^3$ (MW $0,0011 \text{ kg/m}^3$, $\pm 0,0003$, siehe Anhang 4, „Tank 1 und 2 – Vorversuche“). Bei einer Menge von 160 kg Klärschlamm (entspricht 40 kg TM, Umrechnungsfaktor 0,25 siehe „ $\omega_{DM\ 15}$ “, Anhang 2: STOTEN SI Table 3). wurde die $0,05 \text{ kg/m}^3$ Grenze für free P nach 0,5 bzw. 1,25 Stunden überschritten (Abbildung 16)

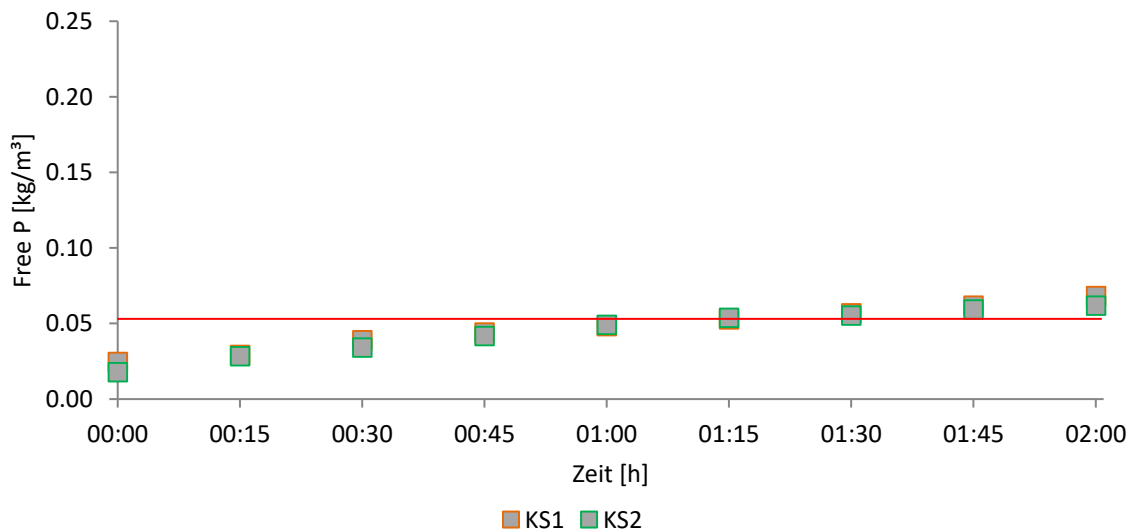


Abbildung 16. Rücklösung von Klärschlämmen (KS) in jeweils 800 l Brauchwasser. Die rote Linie markiert die an free P adaptierte Grenze für die ökonomische Rückgewinnung nach Cornet und Schaum. Zwischen 1,15 h und bei Einsatz von 160 kg Klärschlamm im Tank 1 ist diese Grenze erreicht und damit eine nachfolgende Phosphorrückgewinnung wirtschaftlich.

Zu Beginn der Rücklöseversuche war die free P Konzentration niedrig: $0,024 \text{ kg/m}^3$ (Klärschlamm 1, 11.01.2021) und $0,018 \text{ kg/m}^3$ (Klärschlamm 2, 13.01.2021). Innerhalb von 2 h stieg die Konzentration dann

jedoch auf 0,068 bzw. 0,062 kg/m³ an. In der passiven Inkubationsphase bis 24h änderte sich die free P Konzentration kaum (0,055 kg/m³ (Klärschlamm 1) und 0,068 kg/m³ (Klärschlamm 2)). Für die Rücklösung aus Klärschlamm wird damit eine Klärschlammmenge von 160 kg und 2 Stunden Rücklösung empfohlen.

5.3.2 Zusammenfassung der Werte für Tank 1 für die Prozessschlämme und -wässer

Alle Parameter für die Rücklösungsversuche im Tank 1 sind in Tabelle 2 zusammengefasst. Es gibt starke Unterschiede sowohl im total P, als auch im bound P der Schlämme (z.B. Faulschlamm 1: 1,430 kg/m³ total P und Faulschlamm 2: 0,657 kg/m³ total P, Tabelle 2). Dies liegt einerseits daran, dass es auch im normalen Betriebsablauf der Anlage immer wieder zu Schwankungen der Frachten kommt (vgl. Anhang 2, SI Table 3: total P für Faulschlamm zwischen 0,423 und 1,047 kg/m³). Andererseits beeinflussen auch auftretende Betriebsstörungen diese Werte. So ist z.B. beim Überschussschlamm 1 die Vorklärung außer Betrieb und damit der Wert für total P besonders hoch. Dennoch wurden bei allen Prozessschlammern und -wässern die an free P adaptierte Grenze für die ökonomische Rückgewinnung nach Cornel und Schaum von 0,05 kg /m³ überschritten. Die berechneten P-Gehalte in TM (nach Gleichung 1) sind ähnlich denen der ICP-OES Messung (Tabelle 3).

Beim Vergleich der Werte nach 2 Stunden mit denen in Tank 2 direkt nach Überleitung aus Tank 1 (nach 24-69 Stunden, Tabelle 3) fällt auf, dass für die Mehrzahl der untersuchten Substrate eine geringe Veränderung im free P Gehalt zeigt. Eine sehr starke Veränderung gibt es nur beim Faulschlamm. Hier sinkt der free P Gehalt drastisch ab und liegt sogar unterhalb dessen, was in Tank 1 eingefüllt wurde (Vgl. Tabelle 6)

Tabelle 2. Veränderung des free P Gehaltes zwischen erfolgter Freisetzung in Tank 1 und nach Überleitung in Tank 2. Für den Überschussschlamm wurden die Werte nach 48h und 51h eingefügt. Betriebsstörungen: ⁰¹: Vorklärung außer Betrieb, das komplette Abwasser wird in den Belebungsbecken behandelt. ⁰²: Nachwirkungen von ⁰¹, ⁰³: Zentrifugenproblem, ein Teil des Überschussschlammes ist mit dem Trübwasser vermischt

	2h, free P, Tank 1	free P, Tank 2 (24-69h)	Δ free P
	kg/m ³	kg/m ³	
Trübwasser 1 ⁰³	0,061	0,055	-0,006
Trübwasser 2	0,054	0,054	0,000
Faulschlamm 1	0,180	0,108	-0,072
Faulschlamm 2	0,219	0,107	-0,112
Klärschlamm 1	0,068	0,055	-0,013
Klärschlamm 2	0,062	0,068	0,006
Überschussschlamm 1 ⁰¹	0,051*	0,051*	0,000
Überschussschlamm 2 ⁰²	0,086*	0,086*	0,000

* Rücklösung von Überschussschlamm 48-51 Stunden ohne Rührer, siehe Tabelle 1

Tabelle 3. Tank 1 Rücklösung: Total und free der Schlämme und Wässer im Tank 1 sowie free P nach Ende Rücklösung (2h und 24-69h), die prozentualen Anteil an free P vom total P, die TM Werte für die Schlämme und Wässer und der bound P-Gehalt in diesem TM (entweder über Gleichung 1 und 3 berechnet, oder durch ICP-OES gemessen). Betriebsstörungen: ⁰¹: Vorklärung außer Betrieb, das komplette Abwasser wird in den Belebungsbecken behandelt. ⁰²: Nachwirkungen von ⁰¹, ⁰³: Zentrifugenproblem, ein Teil des Überschussschlammes ist mit Trübwasser vermischt.

	total P Start Rücklösung	free P Start Rücklösung	free P Ende Rücklösung (2h)	free P Ende Rücklösung (24-69 h)	Δ free P Rücklösung (2h)	% free P Rücklösung (2h)	bound P Start Rücklösung	TM Start Rücklösung	STABW TM Start Rücklösung	P-Gehalt in TM (Start Rücklösung)	P-Gehalt _{ICP} in TM (Start Rücklösung)
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	g boundP/kg TM	g totalP/kg TM
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
Trübwasser 1 ⁰³	0,374	0,042	0,061	0,055	0,018	16,176	0,332				
Trübwasser 2	0,132	0,053	0,054	0,054	0,001	41,123	0,079				
Faulschlamm 1	1,430	0,119	0,180	0,108	0,061	12,587	1,311	27,249	0,293	48,111	29,040
Faulschlamm 2	0,657	0,126	0,219	0,107	0,093	33,333	0,531	29,272	0,540	18,140	24,200
Klärschlamm 1	0,723	0,024	0,068	0,055	0,044	9,403	0,699	41,276	1,582	16,929	22,000
Klärschlamm 2	0,883	0,018	0,062	0,068	0,044	6,999	0,865	38,979	3,434	22,202	22,400
Überschussschlamm 1 ⁰¹	0,710	0,019	0,051*	0,051*	0,032	7,155	0,691	12,821	1,065	53,897	
Überschussschlamm 2 ⁰²	0,228	0,009	0,086*	0,086*	0,077	37,719	0,219	8,192	0,000	26,740	26,400

C1, C2, C3, C4, C8: gemessen Küvettentest

C5: C3-C2

C6: $(C3 \times 100\%) / (C1)$

C7: C1-C2

C10: berechnet von der ersten genommenen Probe nach Befüllung von Tank 1: Gleichung 1 und Gleichung 3, Punkt 4.1.7; grau: Klärschlamm über Grenze (AbfKlärV, 2017).

C11: getrocknete Probe vom Tank 1 nach der Befüllung, Messung durch ICP-OES, grau: Klärschlamm über Grenze (AbfKlärV, 2017).

* Rücklösung von Überschussschlamm 48-51 Stunden ohne Rührer, siehe Tabelle 1

Während der Probenahmekampagne für die P-Bilanzen wurden deutlich höhere free P Gehalte für die 4 eingesetzten Prozessschlämme und – wässer gemessen (Abbildung 8, Anhang 2: STOTEN SI Table 3), als hier im Tank 1 freigesetzt wurden. Während der Arbeiten zur P-Bilanzierung (Ende 2018 – Anfang 2020) wurden wesentlich weniger Fällmittel eingesetzt (Abbildung 17) als während des Betriebs des Tank 1 (Mitte 2020 – Anfang 2021). So wurden im Zeitraum Oktober –Dezember 2018 durchschnittlich 0,095 m³ Ferrifloc pro Tag eingesetzt, während es im gleichen Zeitraum 2020 0,34 m³ Ferrifloc pro Tag waren. Trotzdem wurden die ökonomisch sinnvollen Grenzwerte für eine P-Rückgewinnung erreicht.

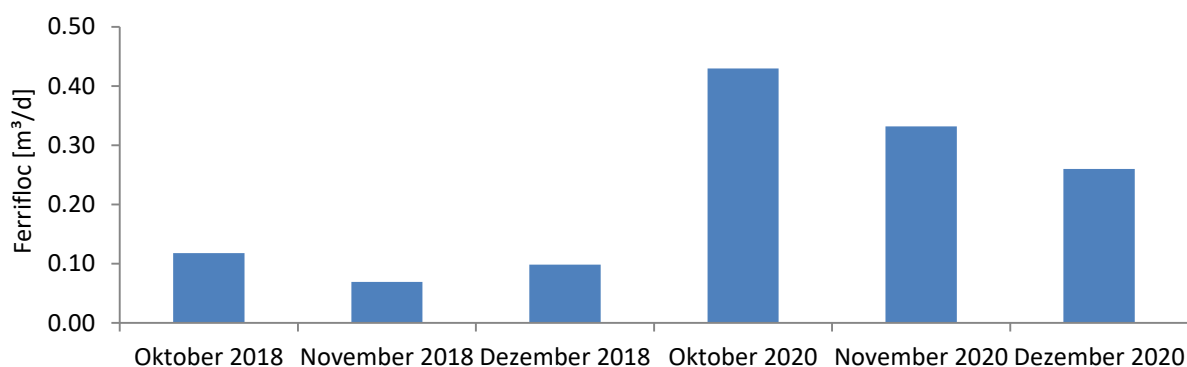


Abbildung 17. Fällmitteleinsatz 4. Quartal 2018 im Vergleich zum 4. Quartal 2020.

Fazit: Für die Rücklösung von free P in Tank 1 wurden für alle 4 Prozessschlämme und –wässer die ökonomisch sinnvollen Grenzwerte (0,05 kg free P/m³) für eine Phosphorrückgewinnung erreicht. Für Klärschlamm wurde dafür eine Menge von 160 kg auf 800 l Brauchwasser und eine Inkubationszeit von maximal 2 h benötigt, um die Grenze sicher zu überschreiten. Für den Überschussschlamm wurden 4-51 Stunden benötigt, um die Grenze von 0,05 kg/m³ zu erreichen. Trübwasser und Faulschlamm liegen in der Regel bereits über der 0,05 kg/m³ Grenze, jedoch konnte aus Faulschlamm noch weiteres free P rückgelöst werden. Aus Trübwasser erfolgt kaum eine Rücklösung, daher wird eine sofortige Anwendung in Tank 2 empfohlen. Für Faulschlamm wird eine Inkubationsdauer von 2 Stunden empfohlen und danach die sofortige Verwendung in Tank 2, bevor das rückgelöste free P wieder in die Schlammmatrix aufgenommen wird.

5.3.3 Modulbetrieb im Tank 2

5.3.3.1 Vorbereitung der Hefen für den Einsatz in Tank 2

In den Vorversuchen (Anhang 4) hat sich gezeigt, dass zusammen mit den Hefen eine erhebliche Menge an free P in Tank 2 eingetragen wird. Dieser Nebeneffekt behindert das eigentliche Ziel der Pilotanlage: die Aufnahme von free P aus den Prozessströmen der Kläranlage. Um dieses Problem zumindest teilweise zu beseitigen, wurden die Hefen aus den Kanistern aus der Brauerei vor ihrem Einsatz einer zusätzlichen Behandlung unterzogen. Die in den Kanistern enthaltenen Brauhefen wurden durch Schütteln in den Kanistern mit der Flüssigkeit vermischt und anschließend über einen Big Bag von der Flüssigkeit im Kanister getrennt. Durch die Poren kann die free P-reiche aber nahezu zellfreie Flüssigkeit (free P 0,3-0,58 kg/m³, im Mittel 0,43 kg/m³ ±0,13 kg/m³, Anhang 4, „Brauheiten“) ablaufen und nach 24 h kann die Hefemasse in den Tank 2 eingesetzt werden (Abbildung 18). Die free P-reiche Flüssigkeit aus den Kanistern kann in Zukunft bereits als erstes Produkt verwendet werden und als P-reicher Dünger getrocknet werden. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, dass die Phosphor-reiche Flüssigkeit aus den Kanistern nicht in den Tank 2

eingetragen wird. Durch eine solche vorgelagerte Entwässerung der Hefen aus der Brauerei wird wesentlich weniger free P in den Tank 2 eingetragen ($0,003\text{--}0,029\text{ kg free P /m}^3$, Tabelle 6 C2).



Abbildung 18. Big Bag mit entwässerter Hefe (links), Hefeentnahme für den Einsatz in Tank 2 (Mitte) und aufgeschlämmte Hefe über Filtersieb (rechts).

Die Konsistenz der entwässerten Hefe macht es schwierig, diese direkt in Tank 2 einzusetzen. Um rasches Absinken von großen Aggregaten zu vermeiden, wird die entwässerte Hefe zunächst in einem 10l-Eimer abgewogen und mit Brauchwasser aufgeschlämmt. Danach wird sie über ein grobporiges Sieb gegossen. So werden pro Versuch 20 kg entwässerte Hefe ($\sim 16,67\text{ kg FM}$, $\sim 4,4\text{ kg TM}$) in Tank 2 eingebracht, bevor der Versuch mit dem Anschalten der Belüftungseinheit startet. Die für die Rückgewinnung in Tank 2 eingesetzten Hefen weisen einen P-Gehalt in TM von $14\text{--}22\text{ g bound P/kg TM}$ auf (Tabelle 7a). Die mit der ICP-OES gemessenen Werte liegen mit $14\text{--}17\text{ g total P/ kg TM}$ leicht darunter (Tabelle 7b).

5.3.3.2 Ernte der Hefen nach dem Einsatz in Tank 2

Die Hefeernte aus den Versuchen wurde gegenüber der im Zwischenbericht erwähnten Variante (Zwischenbericht, S. 29) wie folgt geändert. Die gesamte Phosphoraufnahme im Tank 2 erfolgt innerhalb eines Big Bags ($100\times 100\times 100\text{ cm}$), in den auch die Belüftungsanlage hineingesetzt wurde. Nach Abschaltung der Belüftung in Tank 2 (nach $3,5\text{ h}$ Phosphoraufnahme) wurde für 20 min eine Absetzung der Hefe erlaubt. Die verbleibende Flüssigkeit wurde in dieser Zeit über den Ablauf des Tanks entfernt. Nach Entfernung der Belüftungsanlage wurden die zu Boden gesunkenen Hefen mit einer kleinen Schaufel ausgeschabt (Abbildung 19).



Abbildung 19. Hefeerntung durch Abschaben der Hefen nach Entnahme der Belüftungsanlage aus dem Big Bag.

Der Vorteil dieser Methode ist es, dass die Bauhefen nicht nur schneller geerntet werden können als das im Zwischenbericht beschriebene Verfahren, sondern dass auch nur ein geringes Auswaschen des Phosphors mit Wasser erfolgen kann. Bei der Nutzung des Big Bags werden auch Hefeflocken zurück gehalten, die beim einfachen Absetzverfahren verloren gehen. So konnten nun über 60% der eingesetzten Hefen einfach und schnell geerntet werden. Allerdings wurde festgestellt, dass bei Substraten wie Klärschlamm viele kleine Partikel in die Lösung des Tank 2 transferiert worden sind und dann während der Hefeerntung die Poren sehr schnell verstopfen. Die Produkte aus Tank 2 wurden auf Backblechen im Trockenschrank getrocknet (1-3 h bei 180°C).

5.3.3.3 Reduktion von freiem P und Akkumulation in Hefen aus Prozessschlamm und –wässern in Tank 2

Aus Tank 1 erfolgt die Überführung der Flüssigkeit als Supernatant mit dem gelösten Phosphor in Tank 2. Dabei werden die abgesetzten festen Bestandteile der 4 Prozessströme und – wässer nicht mit überführt. Insgesamt werden nur je 500 L der Flüssigkeit aus Tank 1 in den jeweiligen Tank 2 übertragen. Die Übertragung erfolgt innerhalb von 15 min. Abbildung 20 zeigt die unterschiedlichen Supernatants beim Einfüllen in Tank 2. Faulschlamm (c) und Klärschlamm (d) enthalten besonders viele schwarze Partikel, während Überschussschlamm (a) und Trübwasser (b) deutlich weniger enthalten.

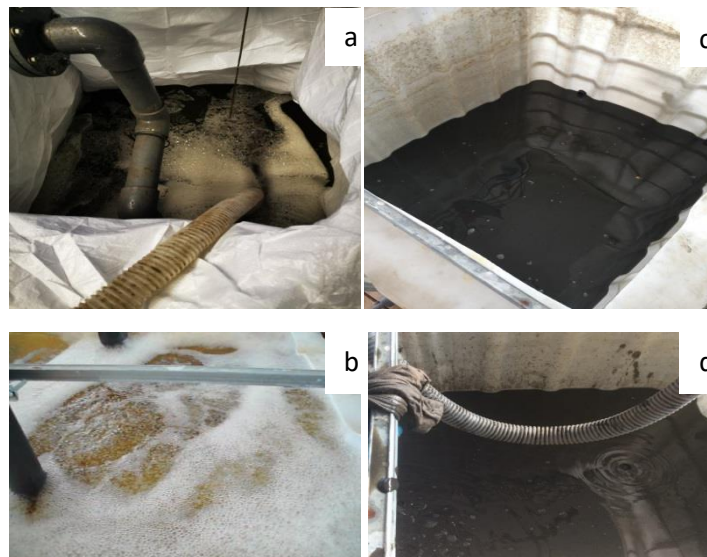


Abbildung 20. Supernatants Überschussschlamm (a), Trübwasser (b), Faulschlamm (c) und Klärschlamm (d) in Tank 2.

Für die Versuche wurde eine Hefe-TM von $8,8 \text{ kg/m}^3$ angestrebt, dafür wurden 20 kg entwässerte Hefe (siehe Punkt 5.3.3.1) abgewogen und diese nach Erreichen der 500 l Füllmenge dazugegeben ($\sim 30 \text{ min}$). Danach wurde die Belüftung (max. 400 l/min) gestartet. Alle Versuche zur Phosphoraufnahme durch die Hefen im Tank 2 erfolgten über einen Zeitraum von 3,5 h ab stetiger Belüftung. Je nach Aktivität der Brauhefe wurde der entstehende Schaum durch 2,5-10 ml Salatöl pro kg zugesetzter Hefe-Frischmasse unter Kontrolle gebracht.

Die unter Punkt 5.3.1.1-5.3.1.4 in Tank 1 hergestellten Substrate 1 aus Überschussschlamm, Trübwasser, Faulschlamm und entwässerten Klärschlamm mit einer free P Konzentration über $0,05 \text{ kg/m}^3$ wurden in Tank 2 überführt und die Hefen als Substrat 2 in den oben angegebenen Konzentrationen dazu gegeben. Bei Trübwasser und Überschussschlamm konnten die Sensoren der Firma Centec parallel zum Versuch laufen, bei Faul- und Klärschlamm waren die Poren des Big Bags in Tank 2 so schnell verstopft, dass von den $0,5 \text{ m}^3$ in Tank 2 keine Flüssigkeit außerhalb des Big Bags gelangte und damit der Sensorbypass (Abbildung 4, Nr. 8) nicht in Betrieb genommen werden konnte. Die Messung der Parameter free P und total P erfolgte wie unter Punkt 4.2.3. beschrieben. Bound P wurde für die eingesetzten Substrate 1 und 2 sowie die geernteten Produkte (Produkt 1: abgereichertes free P von Prozessschlamm und -wässern, Produkt 2: bound P-angereicherte Hefen) nach Gleichung 1 (Punkt 4.1.7) berechnet oder/und über ICP-OES – Messung bestimmt (ICP-OES: Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry). Alle Werte sind in den Tabellen 5-10 bzw. im Anhang 4 („Tank 1 und 2 – Hauptversuche“) zu finden. Die Auswertung in diesen Tabellen basiert auf der Annahme, dass die Prozesse im Tank 2 in folgender Gleichung dargestellt werden können:

Substrat 1 (free P von Prozessschlamm und -wässern + free P eingetragen durch die Hefe) + Substrat 2 (bound P eingesetzte Hefe) = Produkt 1 (abgereichertes free P von Prozessschlamm und -wässern) + Produkt 2 (bound P-angereicherte Hefe)

Ein weiteres Produkt sind die in Tank 1 **bound P-abgereicherten Prozessschlamm und -wässer**. Auf diese wird hier jedoch nicht weiter eingegangen.

5.3.3.3.1 Reduktion von freiem P und P-Akkumulation in Hefen aus Überschussschlamm

Durch die Zugabe der Hefen stieg die free P Konzentration zunächst von $0,051 \text{ kg/m}^3$ um $0,014 \text{ kg/m}^3$ auf $0,065 \text{ kg/m}^3$ (Überschussschlamm 1) und von $0,086 \text{ kg/m}^3$ um $0,012 \text{ kg/m}^3$ auf $0,097 \text{ kg/m}^3$ (Überschussschlamm 2) an. Die Reduktion des free P in Tank 2 während der Inkubation mit den Brauhefen ist in Abbildung 21 gezeigt. Innerhalb von 3,5 Stunden Belüftung wurde die free P Konzentration auf $0,016 \text{ kgP/m}^3$ (ÜS 1) bzw. $0,032 \text{ kgP/m}^3$ (ÜS 2) reduziert. Das entspricht einer Effizienz von 75,3 % für den ersten Versuch (ÜS 1) und 67,6 % für den zweiten (ÜS2).

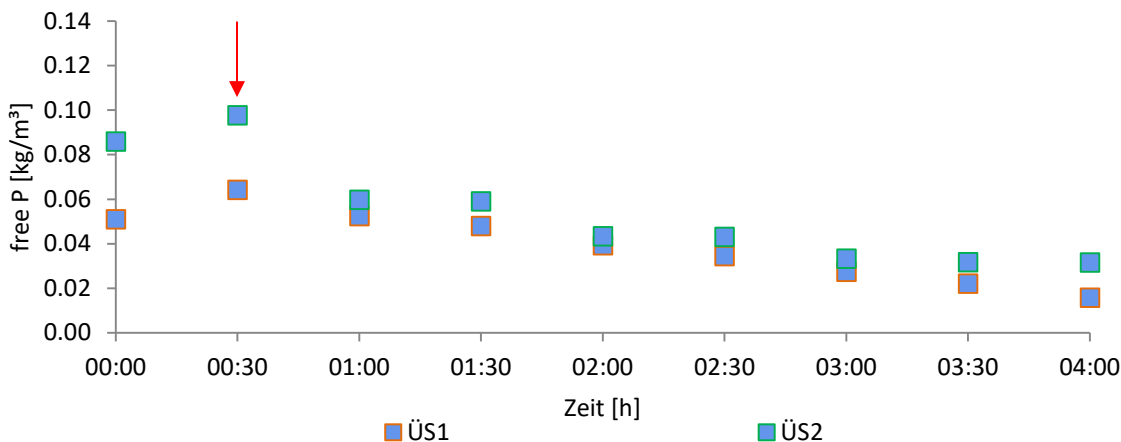


Abbildung 21. Reduktion des free P während 4 h Aufenthalt mit 3,5 h Belüftung in Tank 2 aus dem Substrat Supernatant Überschussschlamm (ÜS). Der rote Pfeil markiert das Ende der Hefezugabe und den Start der Belüftung.

Der Gehalt an bound P im Substrat 2 Hefe wurde bestimmt über die Messung von total P minus free P (Gleichung 1). In Abbildung 21 ist der resultierende bound P-Wert in TM dargestellt. Der P-Gehalt in TM in Produkt 2 Hefe stieg bei Zugabe von Substrat 1 ÜS1 aus Tank 1 ($0,051 \text{ kg freeP/m}^3$, Tabelle 3) von $14,23 \text{ g boundP/kg TM Hefe}$ auf $20,18 \text{ g boundP/kg TM Hefe}$ (Abbildung 22). Damit ergibt sich eine Zunahme von $5,96 \text{ g boundP/kg TM Hefe}$. Im Parallelversuch mit Substrat 2 ÜS2 aus Tank 1 ($0,086 \text{ kg freeP/m}^3$, Tabelle 3) waren die P-Gehalte in den geernteten Hefen noch höher. Die eingesetzten Hefen hatten einen Gehalt von $19,66 \text{ g bound P/kg TM Hefe}$. Bei der nachfolgenden Probe aus Tank 2 wurde ein Gehalt von $25,9 \text{ g boundP/kg TM}$ gemessen. Dieser stieg nach 4 h auf $43,67 \text{ g bound P/kg TM Hefe}$ an. Die Zunahme beträgt für diesen Versuch $24,01 \text{ g boundP/kg TM Hefe}$.

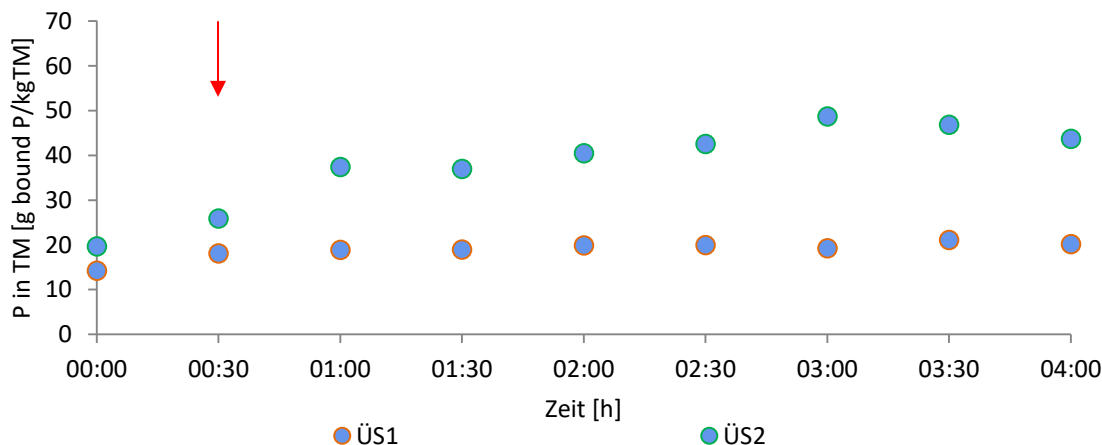


Abbildung 22. Zunahme des boundP in TM Hefe aus dem Substrat Überschussschlamm (ÜS). Der rote Pfeil markiert das Ende der Hefezugabe und den Start der Belüftung.

5.3.3.3.2 Reduktion von freiem P und P-Akkumulation in Hefen aus Trübwasser

Ähnlich gut wie die unter Punkt 5.3.3.1 gezeigte Aufnahme aus Überschussschlamm ist die Aufnahme aus Trübwasser (Abbildung 23). Hier wurden durch die Hefen $0,029 \text{ kg/m}^3$ (Trübwasser 1) bzw. $0,017 \text{ kgP/m}^3$ (Trübwasser 2) free P eingetragen (siehe Tabelle 6). Zusammen mit den vorliegenden Konzentrationen von $0,055 \text{ kgP/m}^3$ und $0,054 \text{ kgP/m}^3$ liegen damit zum Start der Versuche $0,0842 \text{ kgP/m}^3$ und $0,0706$

kgP/m³ im Tank 2 vor. Innerhalb von 3,5 h sinkt die free P Konzentration auf 0,038 kg/m³ (Trübwasser 1) und 0,032 kg/m³ (Trübwasser 2). Die Reduktionseffizienzen liegen bei 54,39 % und 55,38% (Tabelle 6).

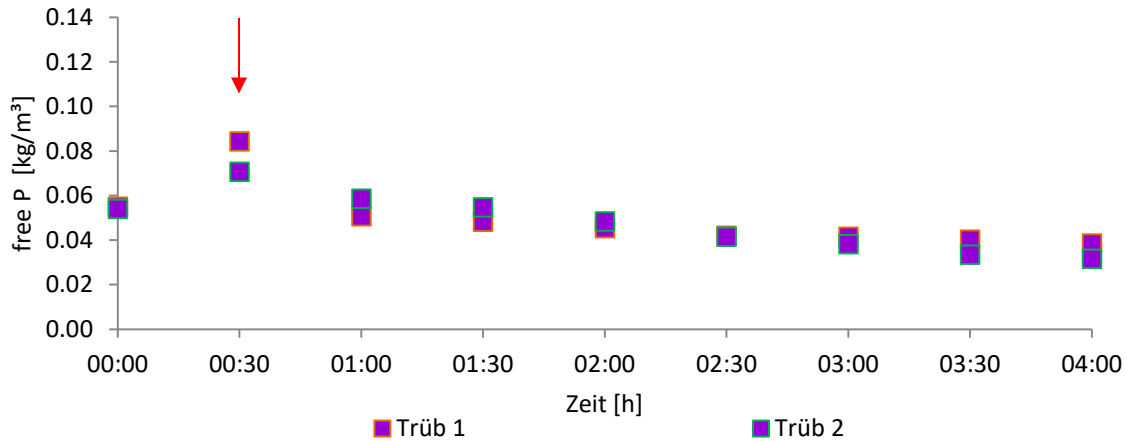


Abbildung 23. Reduktion des free P während 4 h Aufenthalt mit 3,5 h Belüftung in Tank 2 aus dem Substrat Supernatant Trübwasser (Trüb). Der rote Pfeil markiert das Ende der Hefezugabe und den Start der Belüftung.

Der Gehalt an bound P im Substrat 2 Hefe wurde bestimmt über die Messung von total P minus free P (Gleichung 1). In Abbildung 24 ist der resultierende bound P-Wert in TM dargestellt. Der P-Gehalt in TM in Produkt 2 Hefe stieg bei Zugabe von Substrat 1 Trüb1 aus Tank 1 ($0,055 \text{ kg freeP/m}^3$, Tabelle 2) von $22,76 \text{ g boundP/kg TM Hefe}$ auf $70,36 \text{ g boundP/kg TM Hefe}$ (Abbildung 24). Damit ergibt sich eine Zunahme von $47,6 \text{ g boundP/kg TM Hefe}$. Im Parallelversuch mit Substrat 2 Trüb2 aus Tank 1 ($0,054 \text{ kg freeP/m}^3$, Tabelle 3) waren die P-Gehalte in den geernteten Hefen niedriger. Die eingesetzten Hefen hatten ebenfalls einen Gehalt von $22,76 \text{ g bound P/kg TM Hefe}$. Dieser P-Gehalt stieg nach 4 h auf $54,14 \text{ g bound P/kg TM Hefe}$ an. Die Zunahme beträgt für diesen Versuch $31,38 \text{ g boundP/kg TM Hefe}$.

Trotz geringerer Reduktionseffizienzen als beim Überschussschlamm und vergleichbarer Aufnahme an free P liegen die finalen bound P-Gehalte in TM von Hefen deutlich über denen vom Überschussschlamm.

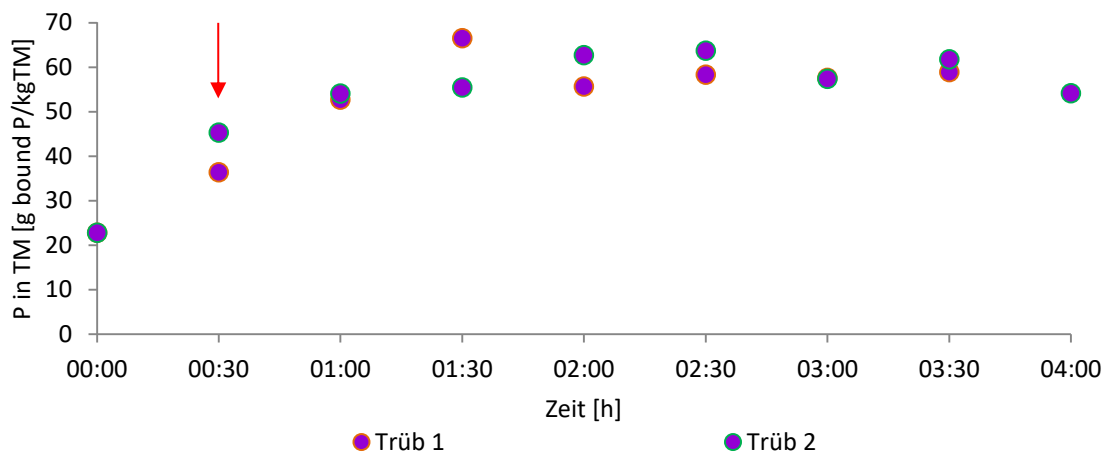


Abbildung 24. Zunahme des bound P in TM Hefe bei Einsatz des Substrates Trübwasser (Trüb). Der rote Pfeil markiert das Ende der Hefezugabe und den Start der Belüftung.

5.3.3.3 Reduktion von freiem P und P-Akkumulation in Hefen aus Faulschlamm

Die höchsten free P Konzentrationen im Tank 2 wurden bei den Versuchen mit Faulschlamm gemessen. Diese lagen bei 0,111 kg/m³ für Versuch 1 und 0,129 kg/m³ für Versuch 2 (Abbildung 25) und setzten sich zusammen aus dem in Tank 1 zurück gelösten P von 0,108 kg/m³ und 0,107 kg/m³ und dem durch die Hefen eingetragenen free P (0,003 kg/m³ und 0,022 kg/m³). Im Versuchsverlauf sinkt die free P Konzentration und erreicht nach 3,5 h Belüftung 0,065 kg/m³ im Versuch 1 und 0,075 kg/m³ im Versuch 2. Die Reduktionseffizienzen betragen entsprechend 41,37% und 41,77%.

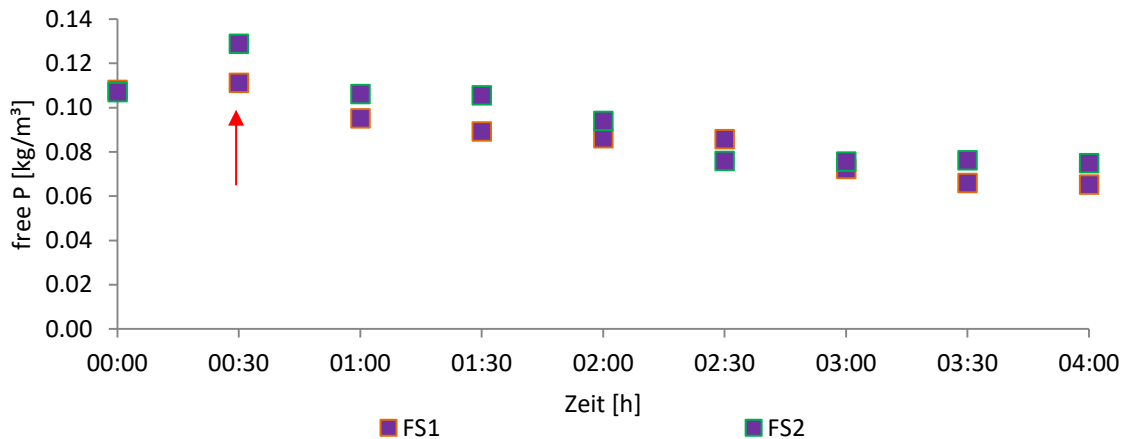


Abbildung 25. Reduktion des free P während 4 h Aufenthalt mit 3,5 h Belüftung in Tank 2 aus dem Substrat Supernatant Faulschlamm (FS). Der rote Pfeil markiert das Ende der Hefezugabe und den Start der Belüftung.

Der Gehalt an bound P im Substrat 2 Hefe wurde bestimmt über die Messung von total P minus free P (Gleichung 1). In Abbildung 26 ist der resultierende bound P-Wert in TM dargestellt. Der P-Gehalt in TM in Produkt 2 Hefe stieg bei Zugabe von Substrat 1 FS1 aus Tank 1 (0,108 kg freeP/m³, Tabelle 3) von 19,66 g boundP/kg TM Hefe auf 23,01 g boundP/kg TM Hefe (Abbildung 26). Damit ergibt sich eine Zunahme von 3,41 g boundP/kg TM Hefe. Im Parallelversuch mit Substrat 2 FS2 aus Tank 1 (0,107 kg freeP/m³, Tabelle 2) waren die P-Gehalte in den geernteten Hefen vergleichbar. Die eingesetzten Hefen hatten einen Gehalt von 22,25 g bound P/kg TM Hefe. Dieser P-Gehalt stieg nach 4 h auf 25,1 g bound P/kg TM Hefe an. Die Zunahme beträgt für diesen Versuch 2,84 g boundP/kg TM Hefe.

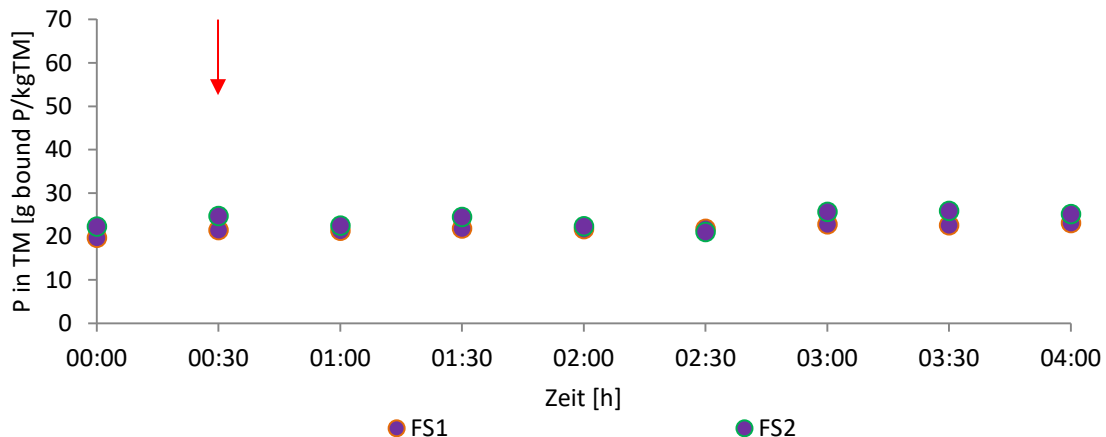


Abbildung 26. Zunahme des bound P in TM Hefe bei Einsatz des Substrates Faulschlamm (FS). Der rote Pfeil markiert das Ende der Hefezugabe und den Start der Belüftung.

5.3.3.3.4 Reduktion von freiem P und P-Akkumulation in Hefen aus Klärschlamm

Aus dem Klärschlamm wurden unter Wasserzugabe 0,055 und 0,068 kg/m³ free P freigesetzt. Dazu kamen 0,006 und 0,026 kg/m³ free P durch die Hefen dazu. Damit liegt die free P Konzentration zum Versuchsstart bei 0,061 (Klärschlammversuch 1) bzw. 0,095 kg/m³ (Klärschlammversuch 2, Abbildung 27). Innerhalb von 4 h wurde die free P Konzentration um 0,021 bzw. 0,058 kg/m³ reduziert und lag am Ende bei 0,041 bzw. 0,037 kg/m³. Die Reduktionseffizienz von Versuch 1 lag bei 34,25% und bei Versuch 2 bei 60,78%.

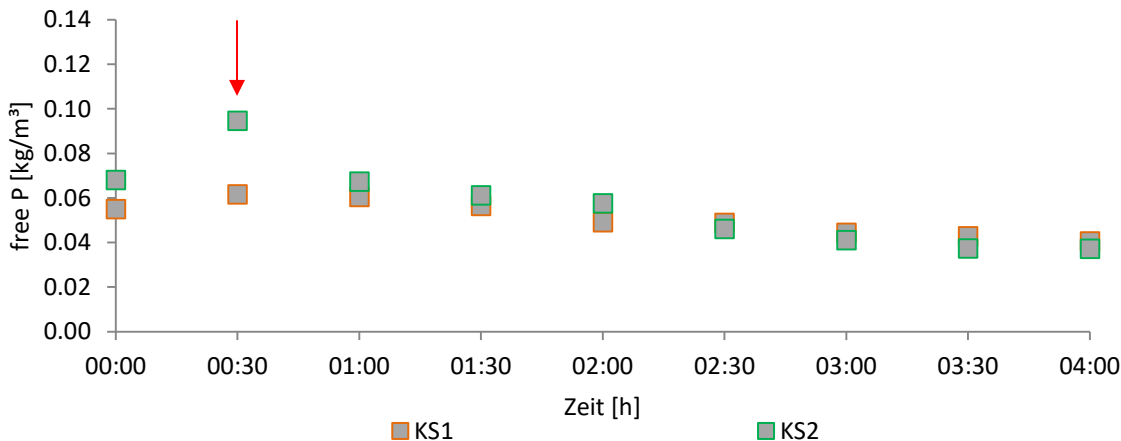


Abbildung 27. Reduktion des free P während 4 h Aufenthalt mit 3,5 h Belüftung in Tank 2 aus dem Substrat Supernatant Klärschlamm (KS). Der rote Pfeil markiert das Ende der Hefezugabe und den Start der Belüftung.

Der Gehalt an bound P im Substrat 2 Hefe wurde bestimmt über die Messung von total P minus free P (Gleichung 1). In Abbildung 28 ist der resultierende bound P-Wert in TM dargestellt. Der P-Gehalt in TM in Produkt 2 Hefe stieg bei Zugabe von Substrat 1 KS1 aus Tank 1 (0,055 kg freeP/m³, Tabelle 2) von 22,94 g boundP/kg TM Hefe auf 30,08 g boundP/kg TM Hefe (Abbildung 28). Damit ergibt sich eine Zunahme von 7,14 g boundP/kg TM Hefe. Im Parallelversuch mit Substrat 2 KS2 aus Tank 1 (0,068 kg freeP/m³, Tabelle 2) waren die P-Gehalte in den geernteten Hefen vergleichbar. Die eingesetzten Hefen hatten einen Gehalt von 22,94 g bound P/kg TM Hefe. Dieser P-Gehalt stieg nach 4 h auf 30,45 g bound P/kg TM Hefe an. Die Zunahme beträgt für diesen Versuch 7,51 g boundP/kg TM Hefe.

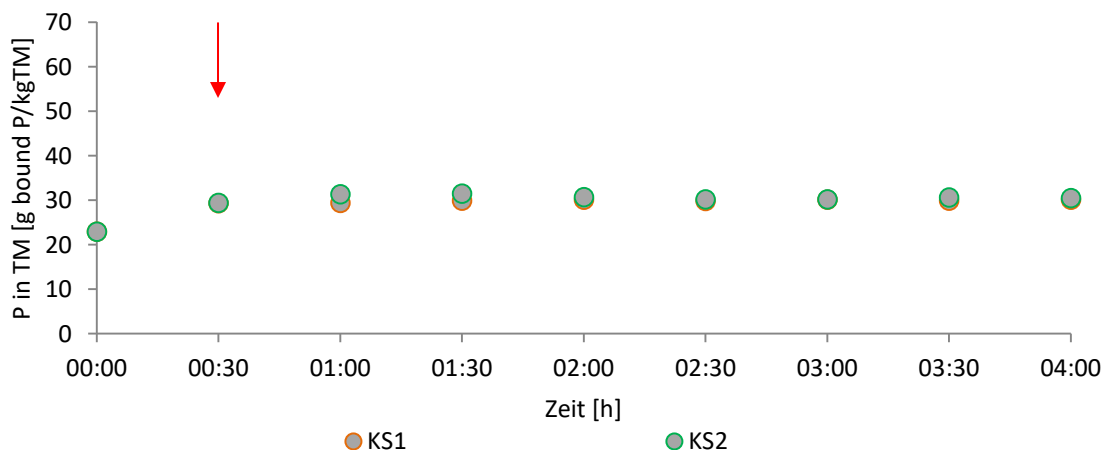


Abbildung 28. Zunahme des bound P in TM Hefe bei Einsatz des Substrates Klärschlamm (KS). Der rote Pfeil markiert das Ende der Hefezugabe und den Start der Belüftung.

5.3.4 Zusammenfassung der Werte für Tank 2 für die Prozessschlämme und -wässer

Die Reduktion von free P aus allen 4 Substraten Supernatant (aus Tank 1 von Überschussschlamm, Trübwasser, Faulschlamm und Klärschlamm) in Tank 2 funktionierte gut. Es wurden Reduktionseffizienzen von 34,25 % (Klärschlamm 2) bis zu 75,27% (Überschussschlamm 1) erreicht (Tabelle 6).

Die Reduktion von freiem P ist bei den Substraten Supernatant aus Trübwasser und Überschussschlamm deutlich besser (54,4-75,27%), als bei Substraten Supernatant Faulschlamm und Extrakt aus Klärschlamm (34,25-60,78%; Tabelle 6).

Obwohl die Abnahme gleichmäßig über die Zeit verteilt erscheint, zeigt eine genauere Betrachtung, dass die größte Menge an free P (bis zu 40% des im Tank 2 vorhandenen free P) während der ersten 30 Minuten aufgenommen wird (Tabelle 4). Danach sinkt die Aufnahme auf rund 5% pro 30 Minuten ab.

Die Reduktion des free P geht einher mit einer P- Aufnahme in die Hefezellen und einem steigenden P-Gehalt in Hefe TM. Bei allen Supernatant-Substraten fand diese Aufnahme in mehr oder weniger großen Umfang statt. Am besten war die Aufnahme aus Trübwasser mit über 30 gboundP/kg TM Hefe und am niedrigsten aus Supernatant Faulschlamm mit rund 3 gboundP/kg TM Hefe (Tabelle 7a). Bei allen Versuchen ist die größte Aufnahme im Schritt zwischen Zugabe der Hefen und dem Start des Experimentes zu beobachten.

Diese Werte werden durch die ICP-OES- Werte im Wesentlichen bestätigt. Die ICP-OES-Werte sind generell etwas niedriger, da das boundP/kg TM Hefe direkt in der geernteten Hefe bestimmt wurde, während die errechneten Werte aus Gleichung 1 auf der Basis der finalen Tank2-Werte vor der Hefeernte erstellt worden sind. Gebundenes P kann sehr schnell wieder aus der Hefe frei gesetzt werden. Daher ist auch für die Zukunft darauf zu achten, dass der Schritt Hefeernte sehr schnell erfolgen muss.

Es kann jedoch ebenfalls davon ausgegangen werden, dass freies P sehr schnell im Tank 2 durch die Hefen gebunden wird und zwar in den ersten 30 min. Dennoch findet während der Behandlung in Tank 2 eine weitere Aufnahme von free P statt, wie die Reduktion des free P während der Versuche zeigen (z.B. Abbildungen 21, 23, 25, und 27). Tabelle 5 zeigt, wie sich der bound P und der P-Gehalt in TM durch die free P Aufnahme in die Zellen theoretisch verändern sollten.

Tabelle 4. Abnahme des free P im Supernatant Tank 2 pro Zeitintervall von 30 Minuten. Die Abnahme bezieht sich auf den Anteil an free P zu Beginn des Experimentes (Start der Belüftung).

Zeit intervall (h)	Supernatant Trüb 1	Supernatant Trüb 2	Supernatant FS 1	Supernatant FS 2	Supernatant KS 1	Supernatant KS 2	Supernatant ÜS1	Supernatant ÜS 2
	free P							
	% von Gesamtanteil free P (%)							
00:30-01:00	39,79	17,14	14,39	17,55	1,95	28,86	18,51	38,79
01:00-01:30	2,97	5,38	5,40	0,47	6,49	6,45	6,84	0,82
01:30-02:00	3,44	9,07	2,70	9,01	11,85	3,91	13,37	15,97
02:00-02:30	4,04	9,63	0,36	13,98	0,49	12,16	7,62	0,31
02:30-03:00	0,59	4,67	12,05	0,31	7,14	5,29	11,04	10,03
03:00-03:30	1,54	6,80	5,76	-0,47	2,60	3,91	8,24	1,54
03:30-04:00	2,02	2,69	0,72	0,93	3,73	0,21	9,64	0,10
Summe	54,39	55,38	41,38	41,78	34,25	60,79	75,26	67,56

Tabelle 5. Erwartete Veränderung des bound P in TM in Substrat 2 und bound P in TM in Produkt 2 durch die komplette Aufnahme des free P aus Tank 2 (Tabelle 6, C5). Angenommen wurde die TM von 8,8 kg/m³ Hefe. Betriebsstörungen: o1: Vorklämung außer Betrieb, das komplette Abwasser wird in den Belebungsbecken behandelt. o2: Nachwirkungen von o1, o3: Zentrifugenproblem, ein Teil des Überschussschlammes ist mit dem Trübwasser vermischt

	Δ free P (vgl. Tab. 6)		bound P Substrat 2 (entwässerte Hefe)		erwartetes bound P Produkt 2	erwarteter P-Gehalt in TM Produkt 2
	C1		C2		C3	C4
	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³	g boundP/kg TM
Trübwasser 1 ^{o3}	0,046	+	0,200	=	0,246	27,99
Trübwasser 2	0,039		0,200		0,239	27,19
Faulschlamm 1	0,046		0,173		0,219	24,89
Faulschlamm 2	0,054		0,196		0,250	28,39
Klärschlamm 1	0,021		0,202		0,223	25,32
Klärschlamm 2	0,058		0,202		0,260	29,53
Überschussschlamm 1 ^{o1}	0,048		0,125		0,173	19,68
Überschussschlamm 2 ^{o2}	0,066		0,173		0,239	27,16

Da bei allen Substraten eine Aufnahme von free P stattfindet, sollte das bound P in den Hefen um diesen Wert steigen. Bei Einsatz von 8,8 kg TM Hefe ergeben sich damit erwartete P-Gehalte von 19-29 g bound P/kg TM. Im Gegensatz dazu zeigen die Werte für die Aufnahme des freien P in die Hefezellen als gebundenes P ein widersprüchliches Bild (Abbildung 22, 24, 26 und 28). Generell zeigten die ICP-OES-Messungen niedrigere Werte für in Hefen gebundenes P an als die über die Gleichung 1 errechneten Werte für gebundenes P sowohl im Substrat 2 also auch im Produkt 2. Mögliche Ursachen werden in der Fehlerbetrachtung diskutiert. Zusätzlich wurden im Trübwasser 1 und 2 sowie in Überschussschlamm 2 deutlich höhere bound P-Gehalte in TM gemessen (Tabelle 7a), als laut Tabelle 5 zu erwarten waren. Die verwendeten Werte für free P sind in Tabelle 6 gezeigt. Bei allen Versuchen zeigen diese ein einheitliches Bild, so dass hier davon ausgegangen werden kann, dass diese Werte korrekt sind. Für alle Schlämme und Wässer konnte eine deutlich Reduktion an free P im Tank 2 nachgewiesen werden. Die in Tabelle 8 aufgeführten total P Werte dienen der Kontrolle und sind bei den meisten Versuchen zwischen den Substraten und den Produkten ähnlich (Tabelle 8, C3 vs. C4). Nur für Trübwasserversuch 1 und Überschussschlamm 2 zeigen hier Abweichungen an. Zur Kontrolle wurden die Werte für die TM der eingesetzten Hefen mit den TM der Hefe, die im Tank 2 gemessen wurde, gegenübergestellt (Tabelle 9). Bei allen Schlämmen und Wässern waren die TM – Werte vergleichbar. Ausnahmen waren auch hier wieder Trübwasser 1 und Überschussschlamm 2. Deren Werte deuten darauf hin, dass hier weniger Hefe mit der Probe gemessen wurde, als klar zu erwarten gewesen wäre.

Fehlerdiskussion: Bei den Versuchen zur free P-Aufnahme aus dem Supernatant gibt es folgende Fehlerquellen: (i) Die Werte für total und free P und total P_{ICP} sind aus Kostengründen jeweils Einzelmessungen. (ii) Die Werte für die bound P-Werte in Hefe auf der Basis der berechneten Werte sowohl für die eingesetzte Hefe als auch für die geerntete Hefe sind zumeist bis zu 25 % über den Werten für die bound P Werte der ICP-OES-Messungen. Hier ist in zukünftigen Experimenten nach Ursachen zu suchen.

(iii) Die Substrate enthalten unterschiedliche Partikelmengen (Trübwasser und Überschussschlamm in der Regel wenige, Faulschlamm und Klärschlamm viele, siehe Abb. 20). Diese können die Aufnahme von free P, als auch den P-Gehalt in TM des geernteten Produktes beeinflussen. (iv) Die Substrate Supernatant 1 enthalten unterschiedliche Mengen an P-Fe-Verbindungen auf Grund der Eisenfällung. Diese P-Fe-Werte könnten die berechneten bound P Werte zum Ende des Versuchs in Tank 2 beeinträchtigen, da die Fe-Kristalle Teil des Produktes sein können (siehe Tabelle 13, Klärschlamm und Faulschlamm). Die Partikelkonzentration spielten bei den gemessenen ICP-OES-Werten für die Hefen kaum noch eine Rolle, da die Hefen von dem Supernatant (mit den enthaltenen Partikeln) für die Messung getrennt worden sind (Tank 2, nach der Ernte). v) Fehlerhafte Probennahme bzw. P-Bestimmung sind ebenfalls mögliche Fehlerquellen sowie kleinere Abweichungen von Versuchsprotokoll (Hefe für Supernatant Trübwasser 1 wurde nicht über Big Bag entwässert, sondern über einen Baumwollbeutel mit einerFruchtpresse). vi) Für den Faulschlamm wurde eine deutliche Reduktion des rückgelösten free P während der Inkubation in Tank 1 um 0,072 bzw. 0,112 kg/m³ beobachtet (2h zu 24h, Tabelle 2). Diese Reduktion könnte sich auch in Tank 2 unabhängig von der Aufnahme durch die Hefen fortsetzen und damit zu der beobachteten free P Reduktionseffizienz beitragen.

Fazit: Die Entwässerung der Hefen vor Versuchsbeginn vermindert den Eintrag von zusätzlichen free P und die Ernte mit Hilfe eines Big Bags verkürzt die Zeit für die Produkternte. Aus allen Substraten wird free P in die Hefen aufgenommen. Die durchschnittliche free P-Reduktion im Substrat beträgt 0,047 kg/m³, die durchschnittliche Akkumulation im Produkt 13,53 g P/kg TM (indirekte Berechnung über Gleichung 1) und 5,12 gP/kg TM (direkte ICP –OES Messung) (Mittelwerte aus Tabelle 6 C5, Tabelle 7a C3 und Tabelle 7b C3). Damit kann das Modul erfolgreich für eine P-Rückgewinnung eingesetzt werden. Weitere Optimierungsschritte sind notwendig.

Tabelle 6. Reduktionseffizienz von free P in Tank 2 vor Hefezugabe (C1), in zugesetzter Hefe (C2) und nach 4h inklusive 3,5h Belüftung (C4). Das reduzierte free P ist in C5 und die Reduktionseffizienz in C6 gegeben. Die Rechenschritte sind unterhalb der Tabelle erklärt. Betriebsstörungen: ^{o1}: Vorklärung außer Betrieb, das komplette Abwasser wird in den Belebungsbecken behandelt. ^{o2}: Nachwirkungen von ^{o1}, ^{o3}: Zentrifugenproblem, ein Teil des Überschussschlammes ist mit dem Trübwasser vermischt

	Substrat 1			->	Produkt 1		=	Δ free P	free P Reduktionseffizienz
	free P Supernatant aus Tank 1 (24 -69 h)	free P Substrat 2 (entwässerte Hefe)	free P Start Experiment Gesamt		free P Ende Experiment				
	C1	C2	C3		C4				
	kg/m³	kg/m³	kg/m³		kg/m³				
Trübwasser 1 ^{o3}	0,055	0,029	0,084	->	0,038	=	0,046	54,394	
Trübwasser 2	0,054	0,017	0,071		0,032		0,039	55,382	
Faulschlamm 1	0,108	0,003	0,111		0,065		0,046	41,367	
Faulschlamm 2	0,107	0,022	0,129		0,075		0,054	41,77	
Klärschlamm 1	0,055	0,006	0,061		0,041		0,021	34,253	
Klärschlamm 2	0,068	0,026	0,094		0,037		0,058	60,782	
Überschussschlamm 1 ^{o1}	0,051	0,014	0,065		0,016		0,048	75,272	
Überschussschlamm 2 ^{o2}	0,086	0,012	0,098		0,032		0,066	67,554	

C1, C3, C4: gemessen

C2: C3-C1

C5: C3-C4

C6: (C5x100%)/(C3)

Tabelle 7. a) P-Gehalt in TM berechnet nach Gleichung 1 und 3 (Punkt 4.1.7) für Substrat 2 (nach Entwässerung (Substrat 2, 24h) und Produkt 2 (letzte Gesamtprobe vor Hefeernte).
b) Gemessener bound P-Gehalt_{ICP} in TM für Substrat 2 und Produkt 2 nach Entwässerung (Substrat 2, 24h) und Ernte über Big Bag bzw. Dekantierung aus Big Bag (Produkt 2, 15 min). Berechnungsschritte sind neben der Tabelle zu finden. Betriebsstörungen: ^{o1}: Vorklärung außer Betrieb, das komplette Abwasser wird in den Belebungsbecken behandelt. ^{o2}: Nachwirkungen von ^{o1}, ^{o3}: Zentrifugenproblem, ein Teil des Überschussschlammes ist mit dem Trübwasser vermischt

a)	Substrat 2	->	Produkt 2	=	Δ P-Gehalt in TM
	P-Gehalt in TM Substrat 2 (entwässerte Hefe)		P-Gehalt in TM Produkt 2 letzte Probe		
	C1		C2		C3
	g boundP/kg TM		g boundP/kg TM		g boundP/kg TM
Trübwasser 1 ^{o3}	22,758	->	70,36	=	47,602
Trübwasser 2	22,758		54,137		31,378
Faulschlamm 1	19,661		23,069		3,407
Faulschlamm 2	22,254		25,096		2,842
Klärschlamm 1	22,938		30,076		7,139
Klärschlamm 2	22,938		30,445		7,508
Überschussschlamm 1 ^{o1}	14,228		20,183		5,955
Überschussschlamm 2 ^{o2}	19,661		43,673		24,012

C1: berechnet aus den Werten für die verwendeten Hefekanister:

Gleichung 1 und Gleichung 3, Punkt 4.1.7

C2: berechnet von der letzten genommenen Probe nach 3,5h Belüftung:

Gleichung 1 und Gleichung 3, Punkt 4.1.7

C3: C2-C1

b)	P-Gehalt _{ICP} in TM Substrat 2 (entwässerte Hefe)	->	P-Gehalt _{ICP} in TM Produkt 2 nach Ernte	=	Δ P-Gehalt _{ICP} in TM
	C1		C2		C3
	g boundIP/kg TM		g boundIP/kg TM		g boundIP/kg TM
Trübwasser 1 ^{o3}	14,52	->	15,84	=	1,32
Trübwasser 2	14,52		20,68		6,16
Faulschlamm 1	16,28		22,88		6,6
Faulschlamm 2	14,08		21,12		7,04
Klärschlamm 1	14,96		19,8		4,84
Klärschlamm 2	15,4		23,76		8,36
Überschussschlamm 1 ^{o1}	16,72		24,64		7,92
Überschussschlamm 2 ^{o2}	16,28		14,96		-1,32

C1, C2: gemessen mittels ICP-OES nach Ernte und Trocknung

C3: C2-C1

Tabelle 8. Kontrolle über total P-Werte, die gleich sein müssen zum Anfang und zum Ende des Experimentes. Total P Werte für das jeweilige Supernatant und die zugegebene Hefe (Substrat 2) in Tank 2 jeweils einzeln (C1 und C2) und als Summe (C3) sowie am Ende des Experimentes (C4). C3 und C4 sollten ähnliche Werte aufweisen. Abweichungen davon sind rot markiert. Berechnungen sind neben der Tabelle zu finden. Betriebsstörungen: ⁰¹: Vorklärung außer Betrieb, das komplette Abwasser wird in den Belebungsbecken behandelt. ⁰²: Nachwirkungen von ⁰¹, ⁰³: Zentrifugenproblem, ein Teil des Überschussschlammes ist mit dem Trübwasser vermischt

	total P Supernatant vor Hefezugabe		total P Substrat 2 (entwässerte Hefe)		total P Supernatant + Substrat 2 (Start)		total P Ende Experiment
	C1		C2		C3		C4
	kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³		kg/m ³
Trübwasser 1 ⁰³	0,087	+	0,229	=	0,316	C3 = C4 ?	0,187
Trübwasser 2	0,13		0,217		0,347		0,447
Faulschlamm 1	0,662		0,176		0,838		0,761
Faulschlamm 2	0,657		0,217		0,874		0,739
Klärschlamm 1	0,641		0,208		0,849		0,832
Klärschlamm 2	1,03		0,228		1,258		1,204
Überschussschlamm 1 ⁰¹	0,513		0,139		0,652		0,551
Überschussschlamm 2 ⁰²	0,228		0,185		0,413		0,193

C1, C2, C4: gemessen

C3: C1+C2

Tabelle 9. Vergleich der TM Werte im Verlauf des Experiments. Standardabweichungen sind in C3 und C5 angegeben. Die TM der Hefe beträgt 4,4 kg auf 0,5 m³ (mit dem Umrechnungsfaktor von entwässelter Hefe zu FM von 1,2 (20kg entwässerte Hefe = 16,67 kg FM) und von FM zu TM von 3,79 (16,67 kg FM = 4,4 kg TM)). Rot markierte Werte weichen stark von den zu erwartenden TM Werten ab.

	TM Hefe eingesetzt Tank 2	TM Tank 2 Start Experiment	STABW TM Tank 2 Start Experiment	TM Tank 2 Ende Experiment	STABW TM Tank 2 Ende Experiment
	C1	C2	C3	C4	C5
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
Trübwasser 1 ^{o3}	8,8	2,81	0,72	2,11	0,16
Trübwasser 2	8,8	8,30	0,08	7,67	1,26
Faulschlamm 1	8,8	30,28	1,76	30,17	2,25
Faulschlamm 2	8,8	24,69	0,59	26,45	0,36
Klärschlamm 1	8,8	26,25	0,44	26,30	0,68
Klärschlamm 2	8,8	37,73	0,16	38,34	0,61
Überschussschlamm 1 ^{o1}	8,8	26,83	3,06	26,50	1,32
Überschussschlamm 2 ^{o2}	8,8	3,68	0,40	3,69	0,08

C1, C2, C4: gemessen

C3, C5: berechnet

Tabelle 10. Zusammenfassung Free P, bound P und P in TM berechnet nach Gleichung 1 und 3 im Vergleich zu den Werten der Bestimmung über ICP-OES. Betriebsstörungen: ^{o1}: Vorklärung außer Betrieb, das komplette Abwasser wird in den Belebungsbecken behandelt. ^{o2}: Nachwirkungen von ^{o1}, ^{o3}: Zentrifugenproblem, ein Teil des Überschussschlammes ist mit dem Trübwasser vermischt

	Substrat Charakterisierung			Produkt Charakterisierung			akkumuliertes P in TM	
	C1	C3	C4	C5	C7	C8	C9	C10
	Free P (Substrat 1 + Substrat 2)	bound P in TM Substrat 2	bound P _{ICP} in TM Substrat 2	Free P (Produkt 1)	bound P in TM Hefe (Produkt 2)	bound P _{ICP} in TM Hefe (Produkt 2)	Δ P in TM	Δ P _{ICP} in TM
	kg/m ³	g P/kg TM	g P/kg TM	kg/m ³	g P/kg TM	g P/kg TM	g P/kg TM	g P/kg TM
Trübwasser 1 ^{o3}	0,084	22,758	14,52	0,038	70,360	15,84	47,602	1,32
Trübwasser 2	0,071	22,758	14,52	0,032	54,137	20,68	31,378	6,16
Faulschlamm 1	0,111	19,661	16,28	0,065	23,069	22,88	3,407	6,6
Faulschlamm 2	0,129	22,254	14,08	0,075	25,096	21,12	2,842	7,04
Klärschlamm 1	0,062	22,938	14,96	0,041	30,076	19,8	7,139	4,84
Klärschlamm 2	0,095	22,938	15,4	0,037	30,445	23,76	7,508	8,36
Überschussschlamm 1 ^{o1}	0,064	14,228	16,72	0,016	20,183	24,64	5,955	7,92
Überschussschlamm 2 ^{o2}	0,098	19,661	16,28	0,032	43,673	14,96	24,012	-1,32

C1: Tabelle6C3

C3: Tabelle7aC1

C4: Tabelle7bC1

C5: Tabelle6C4

C7: Tabelle7bC2

C8: Tabelle7bC2

C9: C7-C3 (Tabelle 7)

C10: C8-C4 (Tabelle7)

5.4 Prozessbegleitende Sensormessungen im Tank 2

Die unter Punkt 5.3.1 in Tank 1 hergestellten Substrate wurden alle in Tank 2 zusammen mit den Hefen getestet. Bei Trübwasser und Überschussschlamm konnten die Sensoren der Firma Centec parallel zum Versuch laufen, bei Faul- und Klärschlamm waren die Poren des Big Bags in Tank 2 so schnell verstopft, dass von den 500 l in Tank 2 keine Flüssigkeit außerhalb des Big Bags gelangte und damit der Sensorbypass (Abbildung 4, Nr. 8) nicht in Betrieb genommen werden konnte.

Im Gegensatz zum Vorprojekt handelt es sich bei den folgenden Untersuchungen um Messungen in einer sehr komplexen Probenmatrix mit einer Vielzahl an gelösten Stoffen, Partikeln und Mikroorganismen. Um die Auswertung zu vereinfachen, sind wir dennoch von einer Grundannahme ausgegangen: die Komplexität des Mediums wird reduziert auf eine wässrige Lösung mit free P und P-akkumulierenden Hefen. Es wird weiterhin davon ausgegangen, dass die Konzentration an Wasser und Hefe über den Versuchsverlauf gleich bleiben und der Lufteintrag über den Sensorbypass konstant ist. Damit entspricht das System einem 4 Komponenten-Gemisch bei dem sich aber nur 2 Komponenten (free und bound P) verändern. Die Änderung dieser 2 Komponenten bewirkt eine Änderung in Schall- und Dichtewerten. Die durch die vorangegangene Kalibrierung ist es nun möglich die Schall und Dichtewerte in Konzentrationen von free und bound P umzurechnen. Das dafür angewandte Berechnungspolynom unterliegt dem Firmengeheimnis der Centec GmbH und kann hier nicht offen gelegt werden.

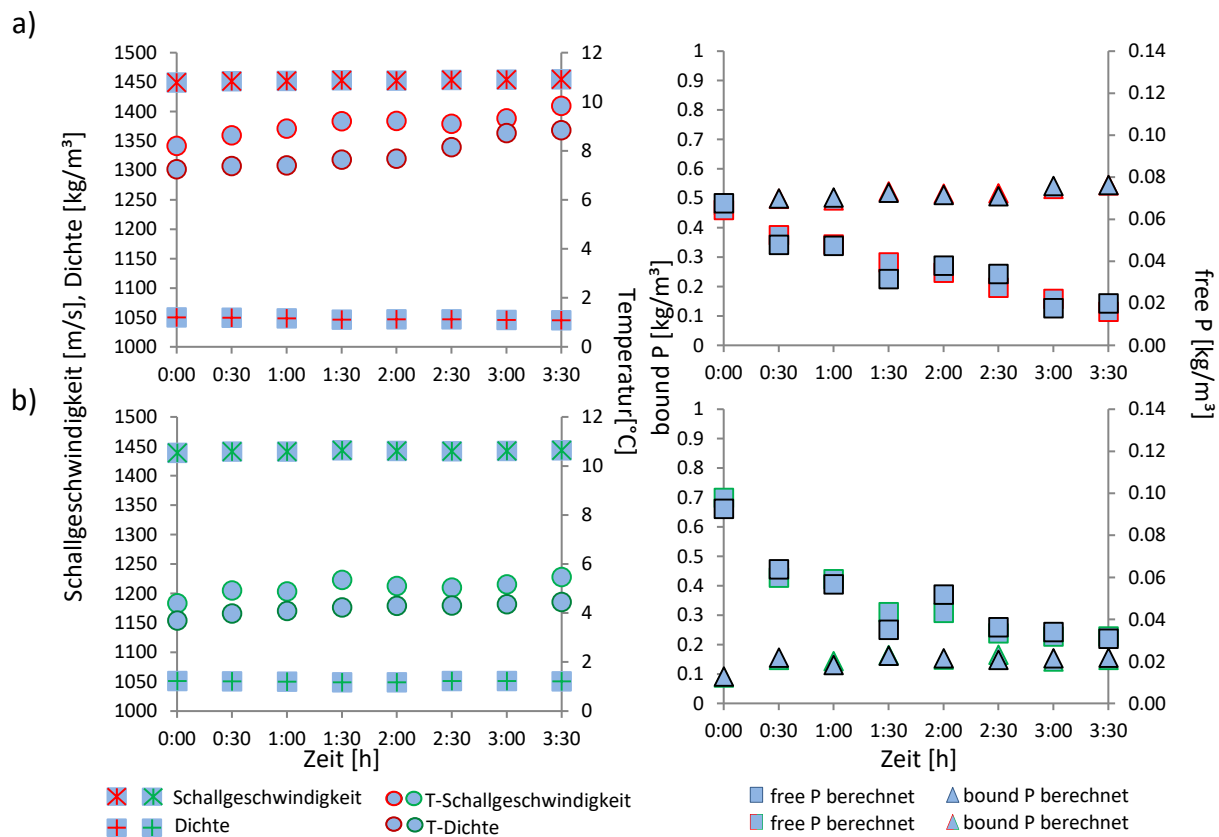


Abbildung 29. Gemessene Schall- und Dichtewerte (rechts) ab Start Belüftung und daraus berechnete Werte für free P und bound P im Vergleich zu den während des Versuchs gemessenen Werten für bound und free P (links, vgl. Abbildung 21) in Überschussschlamm. a) Überschussschlamm 1, b) Überschussschlamm 2 Die 3,5 h entsprechen der Zeit der Belüftung im Tank 2 nach Zugabe der Hefen.

Wie auf der rechten Seite von Abbildung 29 zu sehen ist, liegen die gemessenen und die berechneten Werte für free und bound P jeweils nahe beieinander und zeigen den gleichen zeitlichen Verlauf. Die mittlere Abweichung von gemessenen zu berechneten Werten beträgt bei Überschussschlamm 1: 0,004 kg/m³ free P, 0,006 kg/m³ bound P und Überschussschlamm 2 0,004 kg/m³ free P, 0,008 kg/m³ bound P. Etwas anders sieht es beim Trübwasser aus (Abbildung 30).

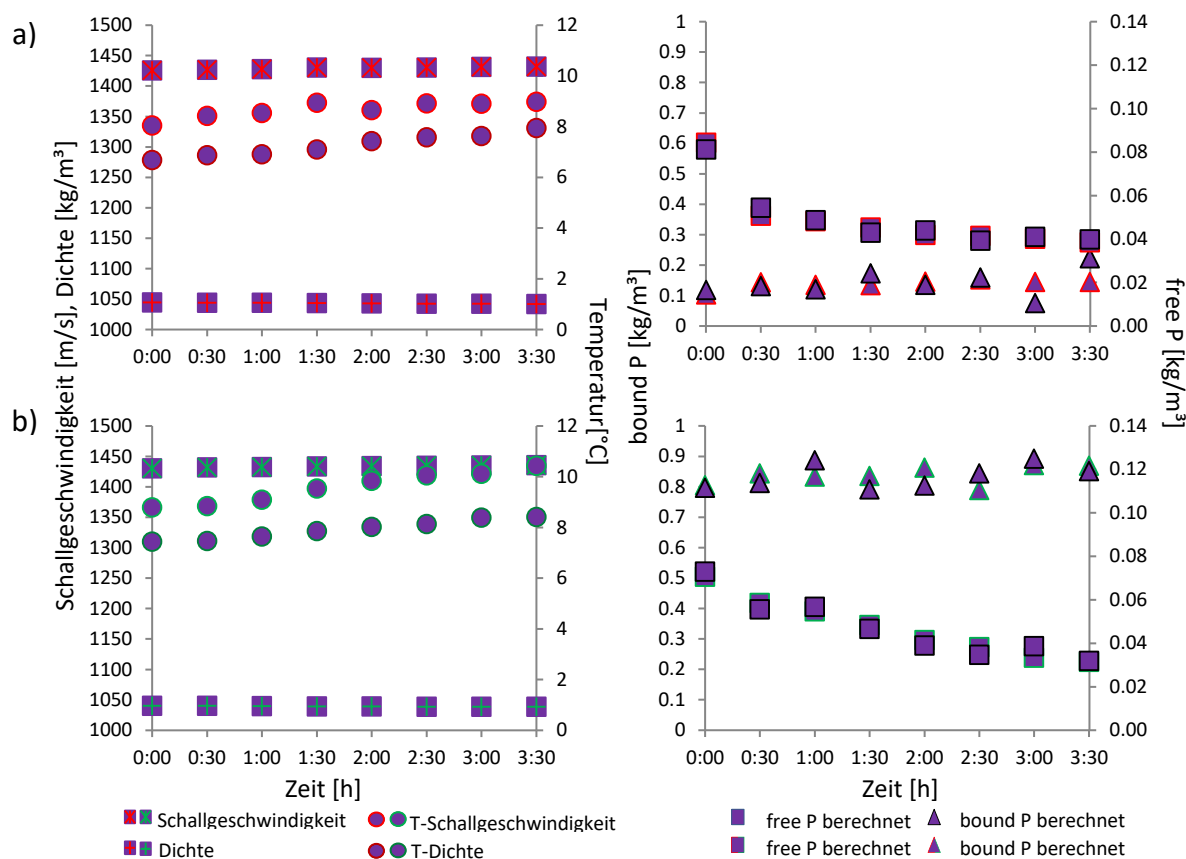


Abbildung 30. Gemessene Schall- und Dichtewerte (rechts) und daraus berechnete Werte für free P und bound P im Vergleich zu den während des Versuchs gemessenen Werten für bound und free P (links, vgl. Abbildung 23) in Trübwasser. a) Trübwasser 1, b) Trübwasser 2. Die 3,5 h entsprechen der Zeit der Belüftung im Tank 2 nach Zugabe der Hefen.

Auch hier liegen die gemessenen und die berechneten Werte für free und bound P jeweils nahe beieinander und zeigen den gleichen zeitlichen Verlauf. Die mittlere Abweichung von gemessenen zu berechneten Werten beträgt bei Trübwasser 1: 0,002 kg/m³ free P, 0,031 kg/m³ bound P und Trübwasser 2: 0,003 kg/m³ free P, 0,037 kg/m³ bound P. Damit sind sowohl bei Überschussschlamm als auch bei Trübwasser die berechneten Werte für free P näher an den gemessenen Werten als bound P.

Fazit: Die Messung von dichte und Schallgeschwindigkeit erlaubt eine sehr gute Berechnung des im Medium befindlichen free P und eine gute Berechnung für das bound P sowohl im Überschussschlamm, als auch im Trübwasser ohne dass dafür Chemikalien eingesetzt werden müssen. Eine Verminderung bzw. gänzliche Vermeidung von Luftblasen während der Messung kann diese Genauigkeit noch weiter steigern. dafür sind allerdings weitere Entwicklungsschritte nötig. Ebenso wäre auch eine Messung von free und bound P als Summenparameter denkbar. Dies entspricht dann dem konventionell gemessenen total P und kann evtl. sogar nur mit einem der beiden Sensoren erfolgen.

5.5 Düngemitteltests (AP15)

Die geernteten Hefeprodukte wurden in 2 Anbaujahren (2019 und 2020) durch das Pflanzenbau Referat 72, Nossen, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie untersucht. Neben den geernteten Schlämmen aus Tank 2 wurde in beiden Jahren auch Brauhefe aus der Brauerei als Kontrolle eingesetzt. Alle Parameter für die Tests sind in Tabelle 11 aufgelistet.

Tabelle 11. Informationen zu den Düngemitteltests der Jahre 2019 und 2020. Die Ernte der Produkte ist im Zwischenbericht S. 30 für 2019 angegeben und für die Produkte aus 2020 wurden ähnlich behandelt, der Schritt mit dem Ausspülen des Tank 2 wurde jedoch ersetzt durch das Abschaben des Tankbodens.

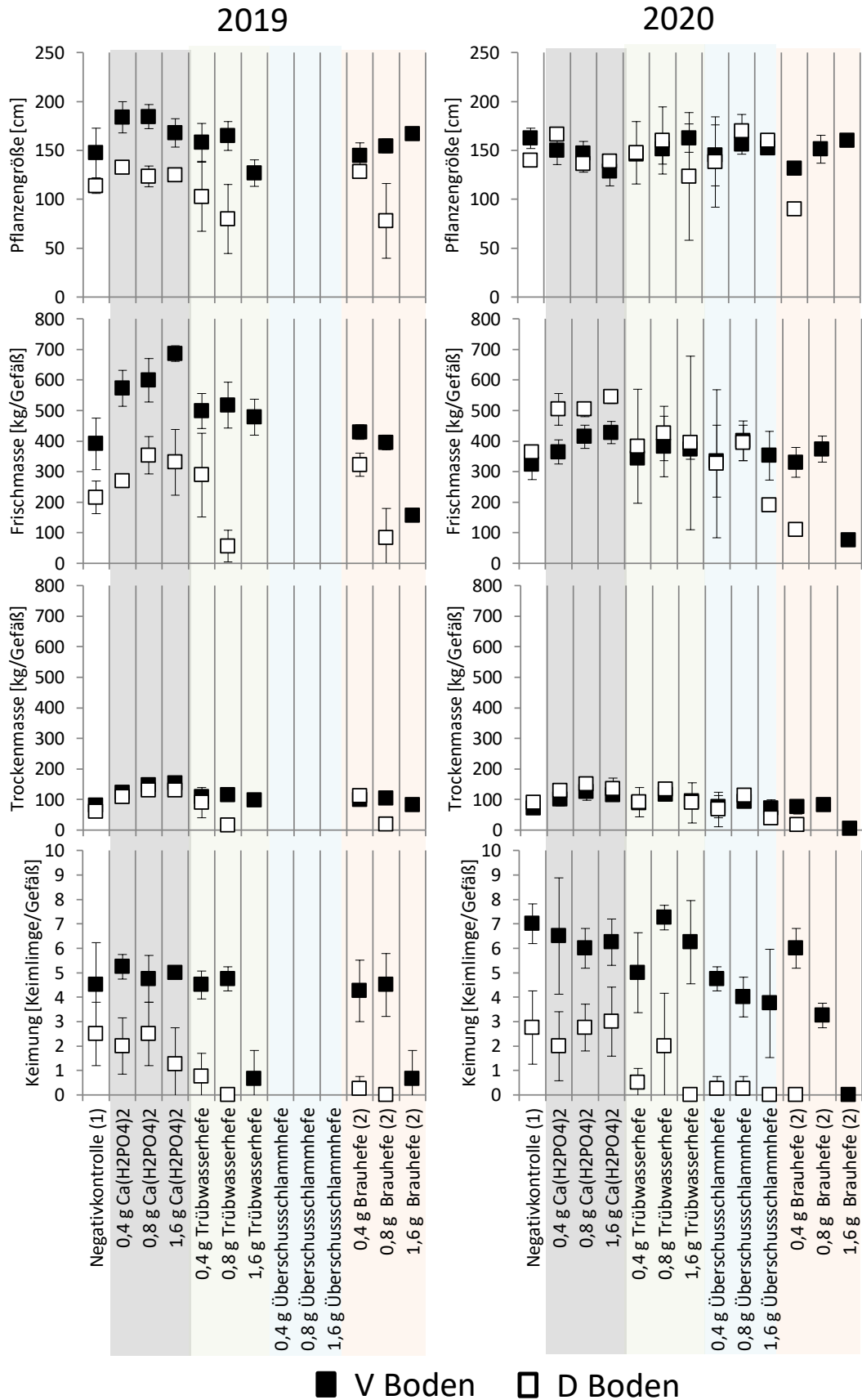
Jahr des Ansatzes	2019	2019	2020	2020	2020
Typ Hefedünger	Hefe aus P-Rückgewinnung aus Trübwasser	Brauhefe	Hefe aus P-Rückgewinnung aus Trübwasser	Hefe aus P-Rückgewinnung aus Überschussschlamm	Brauhefe
geerntete TM für Gefäßversuch[kg]	1,35	1,34	1,00	1,49	1,05
P Gehalt [g P/kg TM]	16,90	11,31	29,73	20,96	12,52
Art der Hefeernte	Absetzung, dekantieren, ausspülen, zentrifugieren	Absetzung, dekantieren, ausspülen, zentrifugieren	Absetzung, dekantieren, abschaben Boden Tank2	Absetzung, dekantieren, abschaben Boden Tank2	Absetzung, dekantieren, abschaben Boden Tank2
Trocknung	dünne Schicht in Petrischalen Trocknung bei 30-50°C für 5-10 d	dünne Schicht in Petrischalen Trocknung bei 30-50°C für 5-10 d	dünne Schicht auf Folie, Trocknung bei Raumtemperatur unter dem Abzug, 3-4 d	dünne Schicht auf Folie, Trocknung bei Raumtemperatur unter dem Abzug, 3-4 d	dünne Schicht auf Folie, Trocknung bei Raumtemperatur unter dem Abzug, 3-4 d
Versuchsfrucht	Mais (Zea mays, Amagrano)				
Boden	Verwitterungsboden (V), Diluvialboden (D)				
Boden pH	5,8 (V), 4,2 (D)				
Hefe eingesetzt [kg TM] in Düngestufe 1 (0,4 g P /Gefäß)	0,026	0,026	0,013	0,019	0,013
Hefe eingesetzt [kg TM] in Düngestufe 2 (0,8 g P /Gefäß]	0,052	0,052	0,027	0,038	0,027
Hefe eingesetzt [kg TM] in Düngestufe 3 (1,6 g P /Gefäß]	0,103	0,103	0,054	0,076	0,054

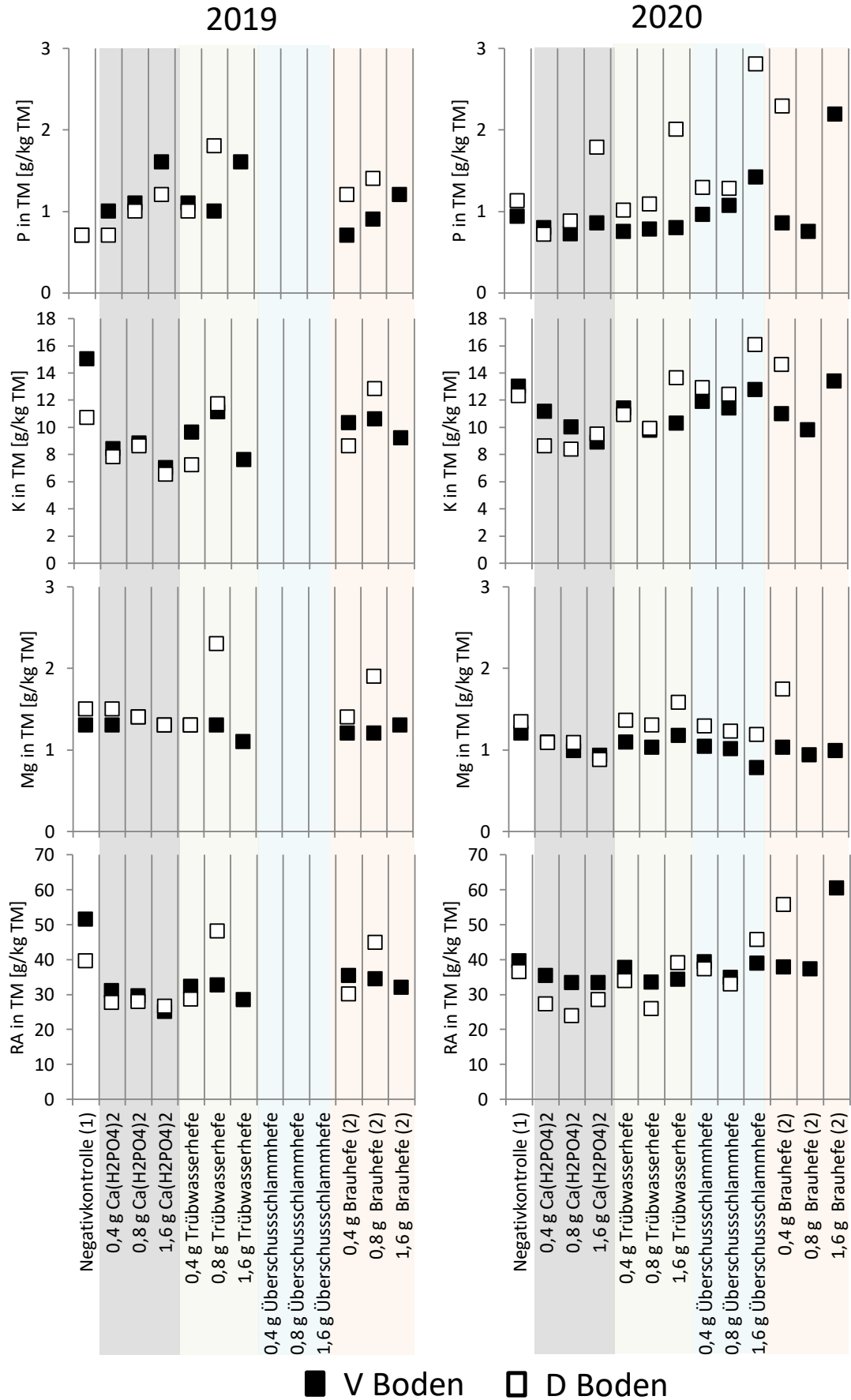
Wie bereits im Vorprojekt (Akkumulation und schadstoffarme Verfügbarmachung von Bio-P aus Klärschlamm, Az: 32062/01-32) wurde auch hier *Zea mays* als Versuchspflanze eingesetzt. Im Unterschied zum Vorprojekt wurden jedoch 2 unterschiedliche Bodentypen für die Versuche ausgewählt. Verwitterungsboden (V) hat einen höheren pH (5,8) als der Diluvialboden (4,2). Beide Bodenarten sind in Deutschland großflächig vertreten. Getestet wurde der Hefedünger in 3 Düngestufen (0,4, 0,8 und 1,6 g P/Gefäß) und in 4 Parallelen. Als Kontrolle dienten eine ungedüngte Variante (negative Kontrolle 1), Brauhefen mit einem niedrigeren P-Gehalt in TM, die in gleicher Menge wie die Testhefen aus Trübwasser zugegeben wurden (negative Kontrolle 2) und die Düngung mit dem mineralischen Dünger Superphosphat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ positive Kontrolle). Bei der Ernte der Produkte aus Tank 2 wurde im Jahr 2019 (Zwischenbericht S. 30) anders vorgegangen, als im Jahr 2020 (der Schritt mit dem Ausspülen des Tank 2 wurde ersetzt durch

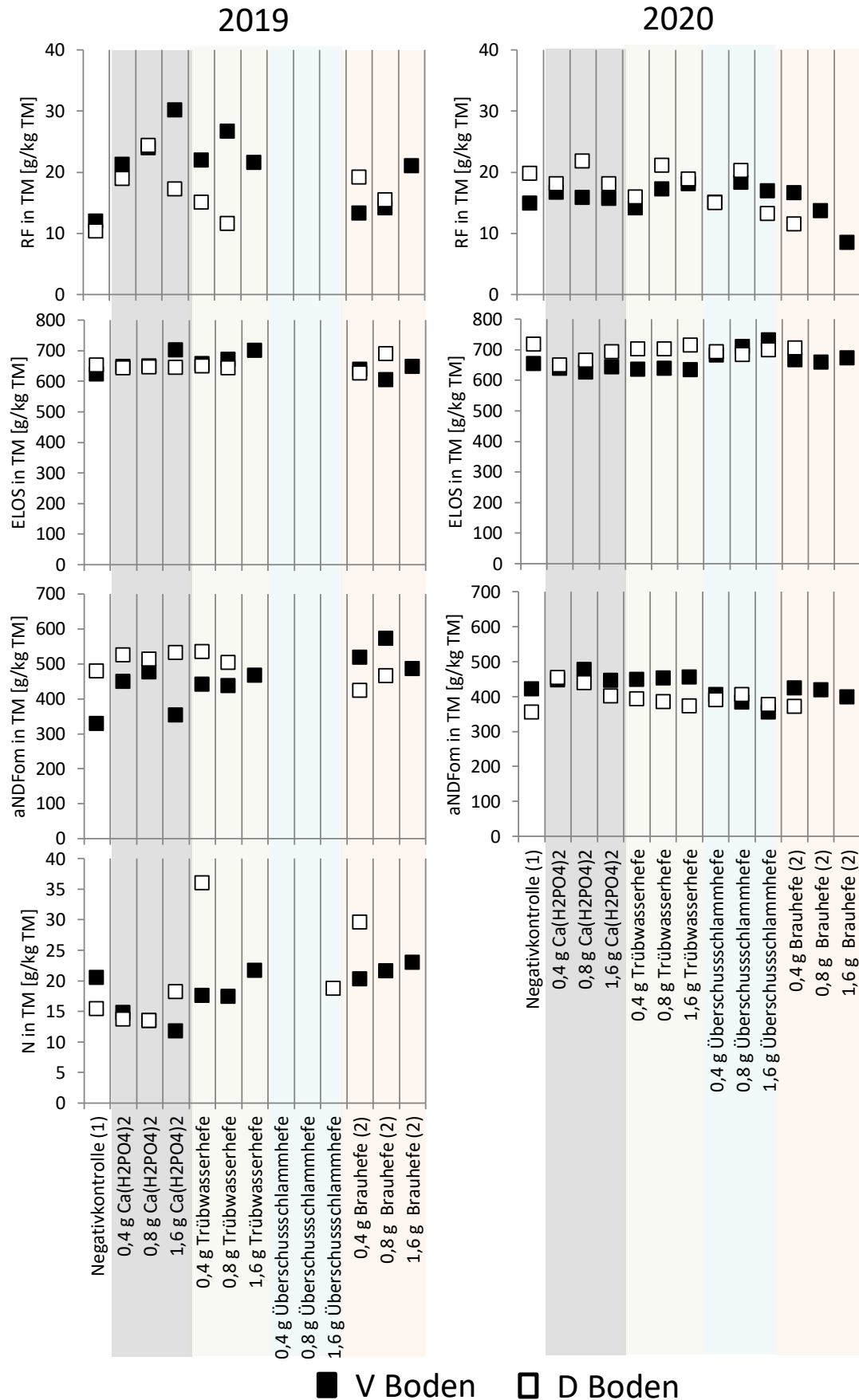
das Abschaben des Tankbodens nach der Entfernung der Flüssigkeit), wodurch der P-Gehalt in den Produkten deutlich höher war als 2019. Der P-Gehalt der Brauhefe war jedoch ähnlich (11,3 vs. 12,5 gP/kg TM). Die Pflanzen wurden nach Saataufgang vereinzelt und bis auf Phosphor mit allen zum Wachsen notwendigen Elementen versorgt. Da die Keimfähigkeit im Jahr 2019 vor allem auf dem D-Boden nicht optimal war, wurde für das Jahr 2020 ein Nachpflanzen von Mais vereinbart, um dennoch die Düngewirkung abschätzen zu können.

Die Daten für die einzelnen Parameter sind in Abbildung 31 für Anbaujahre 2019 (links) und 2020 (rechts) zu sehen. Insgesamt wurden 14 Parameter untersucht. Neben Größe, Frisch- und Trockenmasse der Pflanzen wurde die Keimzahl, der Gehalt an P, Mg, und K sowie Rohasche (RA), Rohfaser (RF) und Rohprotein (RP) bestimmt. Weiterhin wurden ELOS (enzymlösliche organische Substanz), aNDFom (Hemicellulose, Cellulose und Lignin), Stärke und Zucker bestimmt.

Die Originalwerte zu Abbildung 31 und Tabelle 12 sind in im Anhang 4 „Düngemittel Gefäßversuche“ beigefügt. Wie man gut erkennen kann, liegt der Hefedünger aus Trübwasser und Überschussschlamm in den Parametern Größe und Frischmasse gleichauf mit dem mineralischen Dünger (D Boden). Auf V Boden gibt es noch weniger Unterschiede zwischen den einzelnen Düngerarten. Bei TM und Keimzahl liegen die Hefedüngemittel weit unter denen des mineralischen Düngers. Beim V Boden ist dieser Trend auch zu erkennen, obwohl die niedrigeren Dünge­stufen (0,4 und 0,8 g P) in den Bereich des mineralischen Düngers fallen. Betrachtet man die Nährstoffgehalte (P, K, Mg) der Pflanzen, so liegen alle Werte gleichauf bzw. besonders beim D Boden (P und K) deutlich über dem mineralischen Dünger. Bei den weiteren Inhaltsstoffen RF, aNDFom und Stärke liegen die niedrigen Dünge­stufen auf dem D Boden unter der mineralischen Variante, auf dem V Boden ist dies jedoch nur bei aNDFom der Fall. RA, RF, ELOS und Zucker zeigen keinen großen Unterschied zwischen Hefedünger und mineralischen Dünger.







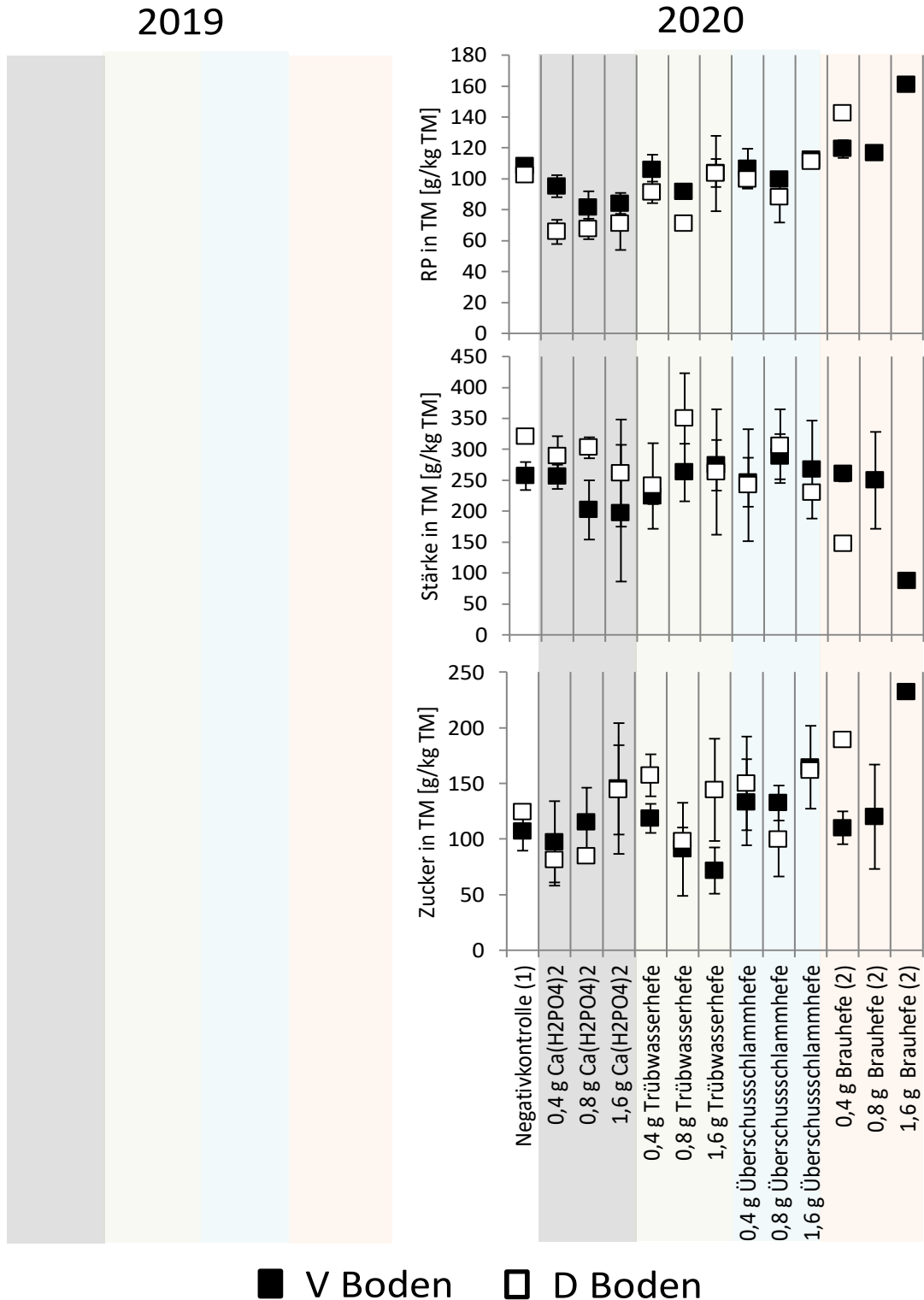
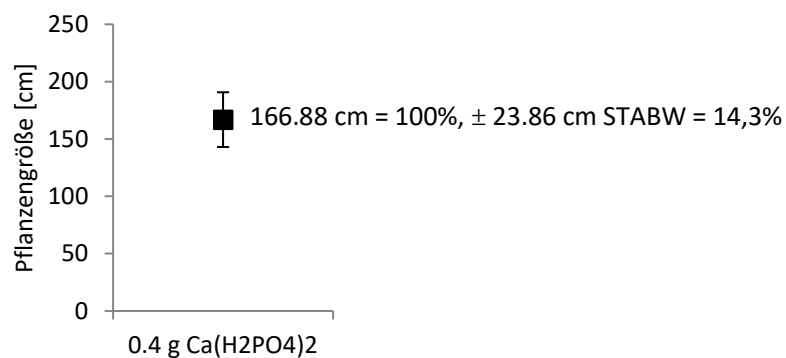


Abbildung 31. Vergleich der 14 Parameter: Pflanzengröße, FM und TM der Pflanzen, Keimzahl, der Gehalt an P, Mg, N und K sowie Rohasche (RA), Rohfaser (RF), Rohprotein (RP), ELOS (enzymlösliche organische Substanz), aNDFom (Hemicellulose, Cellulose und Lignin), Stärke und Zucker auf V und D Boden in den Anbaujahren 2019 und 2020.

Die Auswertung der Werte erfolgt in Tabelle 12. Für diese Auswertung wurden zunächst die jeweiligen Werte von 2019 und 2020 gemittelt. Dann wurden die Werte für den mineralischen Dünger Superphosphat als Referenzwerte in den jeweiligen Parametern festgelegt. Diese entsprechen in der jeweiligen Düngemittelstufe (0,4, 0,8 und 1,6 g P) dann 100% (siehe Beispiel in Abbildung 32) und bilden den jeweiligen Referenzwert. Die Standardabweichung (STABW) des mineralischen Düngers wird ebenso in % umgewandelt. Der zu prüfende Wert für einen Hefe-basierten Dünger (Prüfwert) wird ebenfalls in % umgewandelt (mit dem Referenzwert als 100%). Wenn die Abweichung vom Referenzwert zum Prüfwert innerhalb der STABW des Referenzwertes liegt (Beispiel in Abb.32: Abweichung vom Referenzwert 8,84% und STABW des Referenzwertes 14,3%), dann werden die beiden Werte (Prüf- und Referenzwert) als ähnlich angesehen und die Wirkung der beiden Dünger ist gleich. Dies wird in Tabelle 12 mit einer grünen Farbe markiert. Ist die Abweichung vom Prüfwert zum Referenzwert größer als die STABW des Referenzwertes und ist der Prüfwert selbst größer als der Referenzwert, dann wird dies mit einer dunkelgrünen Farbe markiert, ist er kleiner, wird der Prüfwert in der Tabelle weiß markiert.

Positivkontrolle Superphosphat, V Boden, Mittel 2019, 2020



Produkt aus Trübwasser, V Boden, Mittel 2019,

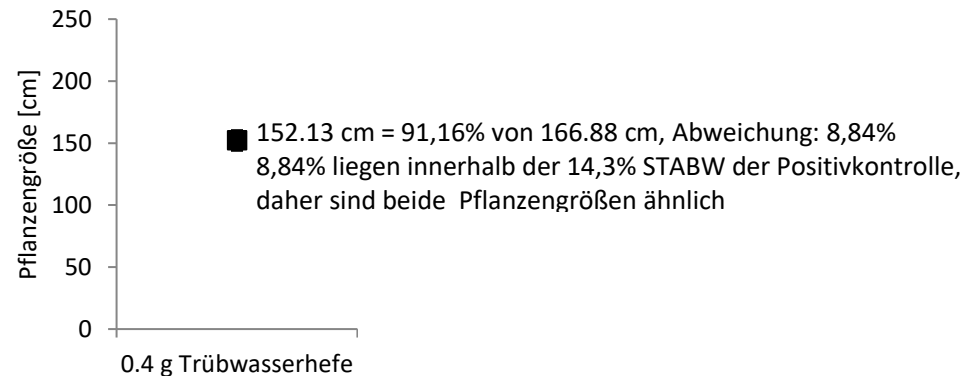


Abbildung 32. Beispielrechnung für den Vergleich zwischen Referenzwert (oben) und Prüfwert (unten).

On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage

Tabelle 12. Vergleich des Pflanzenwachstums und Nährstoffgehalte zwischen 2 Böden (D, V) und unterschiedlicher Düngemittelkonzentrationen (0,4g, 0,8g und 1,6 gP/Topf). Die Wirkung von Hefedünger unterschiedlicher Substrate (Trübwasser, Überschussschlamm) wird dabei mit dem mineralischen Dünger Superphosphat ($\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$) als positiver Kontrolle verglichen. Als negative Kontrolle dienen eine ungedüngte Variante (Kontrolle P- (1)) und Brauhefe ohne Behandlung zur P-Aufnahme (2). Verglichen werden die jeweiligen Parameter innerhalb der Düngemittelstufen des mineralischen Düngers (Referenzwert) nach dem Beispiel in Abbildung 32. Die Werte stellen die über 2 Jahre (2019, 2020) gemittelte prozentuale Abweichung des Prüfwertes von den Referenzwerten dar. Fällt die Abweichung in die Standardabweichung des Referenzwertes, sind die Werte hellgrün gekennzeichnet. Liegen die Abweichungen der Prüfwerte höher als die Standardabweichung des Referenzwertes ist der Wert dunkelgrün markiert. Ein negatives Vorzeichen bedeutet dass der Prüfwert unter dem Referenzwert liegt, bei einem positiven Vorzeichen liegt der Prüfwert darüber.

	SuperPhosphat	D Boden			V Boden		
		0,4 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	0,8 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	1,6 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	0,4 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	0,8 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	1,6 g $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$
		Abweichung vom Referenzwert in %	Abweichung vom Referenzwert in %	Abweichung vom Referenzwert in %	Abweichung vom Referenzwert in %	Abweichung vom Referenzwert in %	Abweichung vom Referenzwert in %
Größe [cm]	Kontrolle P- (1)	-15,02	-2,22	-3,79	-7,12	-6,49	4,55
	0,4 g Trübwasserhefe	-16,27	-3,66	-5,21	-8,84	8,96	2,61
	0,8 g Trübwasserhefe	-19,62	-7,51	-9,00	-5,32	-2,55	6,58
	1,6 g Trübwasserhefe	-17,39	-4,95	-6,48	-13,36	0,00	-2,47
	0,4 g Überschussschlammhefe	-7,34	6,62	4,90	-13,11	3,86	-2,19
	0,8 g Überschussschlammhefe	13,87	31,02	28,91	-6,37	-4,96	5,40
	1,6 g Überschussschlammhefe	7,17	23,31	21,33	-8,61	-4,68	2,87
	0,4 g Brauhefe (2)	-26,99	-15,99	-17,35	-17,18	2,71	-6,77
	0,8 g Brauhefe (2)	-47,75	-39,88	-40,85	-8,39	0,25	3,12
	1,6 g Brauhefe (2)				-2,02	-9,15	10,29
FM [g/Gefäß]	Kontrolle P- (1)	-25,05	-32,42	-33,79	-23,71	-29,48	-35,83
	0,4 g Trübwasserhefe	-13,16	-21,71	-23,29	-10,13	-16,94	-24,41
	0,8 g Trübwasserhefe	-37,78	-43,90	-45,04	-3,97	-11,24	-19,23
	1,6 g Trübwasserhefe	2,08	-7,96	-9,83	-9,10	-15,99	-23,55
	0,4 g Überschussschlammhefe	-15,67	-23,97	-25,51	-28,53	-33,94	-39,89
	0,8 g Überschussschlammhefe	2,07	-7,98	-9,84	-14,44	-20,92	-28,04
	1,6 g Überschussschlammhefe	-50,93	-55,76	-56,65	-24,76	-30,45	-36,71
	0,4 g Brauhefe (2)	-44,09	-49,59	-50,61	-18,89	-25,03	-31,78
	0,8 g Brauhefe (2)	-78,54	-80,65	-81,05	-17,99	-24,20	-31,03
	1,6 g Brauhefe (2)				-75,28	-77,16	-79,21
TM [g/Gefäß]	Kontrolle P- (1)	-36,74	-46,66	-43,36	-31,96	-44,56	-43,46
	0,4 g Trübwasserhefe	-23,11	-35,17	-31,16	-11,97	-28,26	-26,84
	0,8 g Trübwasserhefe	-36,90	-46,80	-43,51	3,95	-15,29	-13,61
	1,6 g Trübwasserhefe	-24,26	-36,14	-32,19	-14,12	-30,02	-28,63
	0,4 g Überschussschlammhefe	-42,74	-51,72	-48,73	-31,15	-43,89	-42,78
	0,8 g Überschussschlammhefe	-3,99	-19,05	-14,04	-16,19	-31,70	-30,35
	1,6 g Überschussschlammhefe	-66,99	-72,17	-70,45	-36,02	-47,87	-46,83
	0,4 g Brauhefe (2)	-45,99	-54,46	-51,64	-21,35	-35,91	-34,64
	0,8 g Brauhefe (2)	-83,58	-86,15	-85,30	-16,66	-32,09	-30,74
	1,6 g Brauhefe (2)				-61,11	-68,31	-67,68
Keimzahl [Pflanzen/Gefäß]	Kontrolle P- (1)	31,25	0,00	23,53	-2,13	6,98	2,22
	0,4 g Trübwasserhefe	-68,75	-76,19	-70,59	-19,15	-11,63	-15,56
	0,8 g Trübwasserhefe	-50,00	-61,90	-52,94	2,13	11,63	6,67
	1,6 g Trübwasserhefe	-100,00	-100,00	-100,00	-41,13	-35,66	-38,52
	0,4 g Überschussschlammhefe	-87,50	-90,48	-88,24	-19,15	-11,63	-15,56
	0,8 g Überschussschlammhefe	-87,50	-90,48	-88,24	-31,91	-25,58	-28,89
	1,6 g Überschussschlammhefe	-100,00	-100,00	-100,00	-36,17	-30,23	-33,33
	0,4 g Brauhefe (2)	-93,75	-95,24	-94,12	-12,77	-4,65	-8,89
	0,8 g Brauhefe (2)	-100,00	-100,00	-100,00	-34,04	-27,91	-31,11
	1,6 g Brauhefe (2)				-94,33	-93,80	-94,07
P [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	28,96	-2,57	-38,76	-9,05	-10,08	-33,28
	0,4 g Trübwasserhefe	42,04	7,32	-32,55	2,71	1,56	-24,65
	0,8 g Trübwasserhefe	103,90	54,06	-3,17	-0,99	-2,11	-27,37
	1,6 g Trübwasserhefe	183,02	113,83	34,41	33,35	31,85	-2,17
	0,4 g Überschussschlammhefe	82,12	37,60	-13,51	6,76	5,55	-21,68
	0,8 g Überschussschlammhefe	80,52	36,39	-14,27	18,54	17,20	-13,04
	1,6 g Überschussschlammhefe	295,63	198,92	87,88	57,77	56,00	15,74
	0,4 g Brauhefe (2)	146,06	85,91	16,86	-13,66	-14,63	-36,66
	0,8 g Brauhefe (2)	97,69	49,37	-6,12	-8,31	-9,34	-32,74
	1,6 g Brauhefe (2)				88,59	86,46	38,35
K [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	40,20	35,62	43,94	43,18	48,82	76,17
	0,4 g Trübwasserhefe	10,33	6,73	13,28	7,39	11,62	32,14
	0,8 g Trübwasserhefe	31,70	27,41	35,22	6,69	10,90	31,28
	1,6 g Trübwasserhefe	65,99	60,58	70,42	-8,59	-4,98	12,48
	0,4 g Überschussschlammhefe	57,23	52,10	61,42	21,68	26,47	49,71
	0,8 g Überschussschlammhefe	51,40	46,47	55,44	16,72	21,32	43,62
	1,6 g Überschussschlammhefe	95,86	89,47	101,08	30,63	35,78	60,73
	0,4 g Brauhefe (2)	41,39	36,77	45,16	8,85	13,14	33,93
	0,8 g Brauhefe (2)	56,14	51,05	60,31	4,30	8,41	28,33
	1,6 g Brauhefe (2)				15,45	20,00	42,05
Mg [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	9,81	14,25	30,49	4,67	4,94	12,14
	0,4 g Trübwasserhefe	2,73	6,88	22,07	0,12	0,39	7,28
	0,8 g Trübwasserhefe	39,14	44,76	65,34	-2,60	-2,35	4,36
	1,6 g Trübwasserhefe	21,84	26,76	44,79	-5,04	-4,79	1,74
	0,4 g Überschussschlammhefe	-0,39	3,63	18,36	-13,01	-12,78	-6,79
	0,8 g Überschussschlammhefe	-5,31	-1,49	12,52	-15,29	-15,07	-9,23
	1,6 g Überschussschlammhefe	-8,38	-4,67	8,88	-35,07	-34,90	-30,43

On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage

	0,4 g Brauhefe (2)	21,40	26,30	44,26	-6,72	-6,48	-0,06
	0,8 g Brauhefe (2)	46,87	52,80	74,52	-10,66	-10,43	-4,28
	1,6 g Brauhefe (2)				-4,38	-4,13	2,45
RA [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	38,66	46,94	38,18	37,17	45,02	56,01
	0,4 g Trübwasserhefe	13,96	20,77	13,56	5,37	11,40	19,83
	0,8 g Trübwasserhefe	34,89	42,94	34,42	-0,41	5,29	13,26
	1,6 g Trübwasserhefe	42,32	50,82	41,82	-5,30	0,12	7,70
	0,4 g Überschussschlammhefe	35,96	44,08	35,49	18,46	25,24	34,72
	0,8 g Überschussschlammhefe	20,26	27,44	19,84	4,82	10,83	19,22
	1,6 g Überschussschlammhefe	66,38	76,32	65,80	17,04	23,74	33,11
	0,4 g Brauhefe (2)	56,42	65,76	55,87	10,30	16,62	25,45
	0,8 g Brauhefe (2)	63,90	73,68	63,32	7,93	14,11	22,75
	1,6 g Brauhefe (2)				39,19	47,16	58,30
RF [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	-18,61	-34,78	-14,71	-29,37	-32,63	-41,56
	0,4 g Trübwasserhefe	-16,31	-32,93	-12,30	-5,08	-9,45	-21,45
	0,8 g Trübwasserhefe	-11,83	-29,35	-7,61	15,63	10,30	-4,32
	1,6 g Trübwasserhefe	1,92	-18,32	6,80	4,37	-0,44	-13,63
	0,4 g Überschussschlammhefe	-19,20	-35,25	-15,33	-20,90	-24,54	-34,54
	0,8 g Überschussschlammhefe	9,53	-12,23	14,77	-3,63	-8,06	-20,25
	1,6 g Überschussschlammhefe	-28,77	-42,92	-25,36	-10,83	-14,94	-26,21
	0,4 g Brauhefe (2)	-17,30	-33,73	-13,34	-21,46	-25,07	-35,00
	0,8 g Brauhefe (2)	-16,56	-33,13	-12,56	-26,71	-30,09	-39,35
	1,6 g Brauhefe (2)				-22,29	-25,86	-35,69
RP [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	56,08	51,92	44,40	13,61	32,99	28,65
	0,4 g Trübwasserhefe	38,70	35,01	28,33	11,26	30,24	25,99
	0,8 g Trübwasserhefe	8,17	5,29	0,08	-3,70	12,73	9,05
	1,6 g Trübwasserhefe	57,62	53,42	45,83	8,97	27,56	23,39
	0,4 g Überschussschlammhefe	51,67	47,63	40,33	11,95	31,04	26,77
	0,8 g Überschussschlammhefe	34,26	30,68	24,22	4,63	22,48	18,48
	1,6 g Überschussschlammhefe	68,96	64,46	56,33	18,00	38,13	33,63
	0,4 g Brauhefe (2)	117,00	111,22	100,77	25,31	46,68	41,90
	0,8 g Brauhefe (2)				22,68	43,61	38,92
	1,6 g Brauhefe (2)				69,09	97,94	91,48
ELOS [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	5,89	4,39	2,36	-0,68	0,26	-4,98
	0,4 g Trübwasserhefe	4,52	3,03	1,03	0,38	1,33	-3,97
	0,8 g Trübwasserhefe	4,02	2,55	0,55	1,81	2,78	-2,59
	1,6 g Trübwasserhefe	10,43	8,86	6,74	3,75	4,74	-0,74
	0,4 g Überschussschlammhefe	7,09	5,57	3,51	5,95	6,96	1,37
	0,8 g Überschussschlammhefe	5,66	4,16	2,13	10,20	11,24	5,43
	1,6 g Überschussschlammhefe	8,17	6,63	4,55	13,63	14,71	8,72
	0,4 g Brauhefe (2)	3,01	1,55	-0,43	1,39	2,35	-3,00
	0,8 g Brauhefe (2)	6,73	5,21	3,16	-1,90	-0,97	-6,15
	1,6 g Brauhefe (2)				2,58	3,55	-1,86
aNFom [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	-14,82	-12,46	-10,70	-16,25	-21,31	-6,06
	0,4 g Trübwasserhefe	-5,25	-2,63	-0,66	-0,71	-6,71	11,37
	0,8 g Trübwasserhefe	-9,25	-6,74	-4,86	-0,79	-6,79	11,28
	1,6 g Trübwasserhefe	-23,75	-21,64	-20,06	2,98	-3,25	15,50
	0,4 g Überschussschlammhefe	-20,29	-18,09	-16,43	-9,37	-14,86	1,65
	0,8 g Überschussschlammhefe	-17,20	-14,90	-13,18	-14,17	-19,37	-3,74
	1,6 g Überschussschlammhefe	-22,83	-20,70	-19,09	-20,81	-25,60	-11,18
	0,4 g Brauhefe (2)	-18,77	-16,52	-14,83	5,23	-1,13	18,03
	0,8 g Brauhefe (2)	-5,06	-2,44	-0,47	10,67	3,98	24,13
	1,6 g Brauhefe (2)				-1,24	-7,22	10,76
Stärke [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	10,94	5,99	22,61	0,42	27,22	30,59
	0,4 g Trübwasserhefe	-16,69	-20,40	-7,92	-12,65	10,66	13,59
	0,8 g Trübwasserhefe	20,91	15,51	33,62	2,69	30,09	33,53
	1,6 g Trübwasserhefe	-8,95	-13,01	0,63	7,35	36,00	39,60
	0,4 g Überschussschlammhefe	-16,20	-19,94	-7,38	-3,52	22,22	25
	0,8 g Überschussschlammhefe	5,65	0,94	16,77	12,69	42,75	46,53
	1,6 g Überschussschlammhefe	-20,62	-24,17	-12,27	4,60	32,51	36,02
	0,4 g Brauhefe (2)	-49,20	-51,47	-43,85	1,89	29,07	32,49
	0,8 g Brauhefe (2)				-2,42	23,62	26,89
	1,6 g Brauhefe (2)				-66,09	-57,04	-55,91
Zucker [g/kg TM]	Kontrolle P- (1)	53,24	47,25	-13,68	9,49	-7,40	-26,60
	0,4 g Trübwasserhefe	93,42	85,85	8,95	21,57	2,82	-18,50
	0,8 g Trübwasserhefe	20,99	16,26	-31,84	-6,87	-21,24	-37,57
	1,6 g Trübwasserhefe	77,47	70,52	-0,03	-26,65	-37,97	-50,83
	0,4 g Überschussschlammhefe	84,66	77,43	4,02	36,63	15,55	-8,40
	0,8 g Überschussschlammhefe	22,57	17,78	-30,96	35,86	14,90	-8,92
	1,6 g Überschussschlammhefe	99,01	91,22	12,10	68,58	42,58	13,02
	0,4 g Brauhefe (2)	133,11	123,99	31,31	12,85	-4,56	-24,34
	0,8 g Brauhefe (2)				23,15	4,16	-17,44
	1,6 g Brauhefe (2)				138,26	101,50	59,73

Zusammenfassend lässt sich folgendes feststellen: der D Boden scheint, was den Ertrag an Pflanzenmasse angeht, etwas schlechter zu sein, als der V Boden, obwohl P bei niedrigerem pH deutlich besser pflanzenverfügbar sein sollte. Trotz schlechterem Wachstum sind die Gehalte an Nähr- und sonstigen

Inhaltsstoffen sowohl zwischen den Böden als auch zwischen allen Düngevarianten ähnlich. Teilweise liegt sogar die ungedüngte Kontrolle über den Werten des mineralischen Düngers (Vgl. K, RA, RP, Stärke). Über die Gründe hinter der verminderten Keimfähigkeit der mit Hefedünger behandelten Gefäße kann nur spekuliert werden. Nach Angaben der Literatur wurde bei den Hefedüngern mit einer ähnlichen, wenn nicht sogar deutlich erhöhten, Keimzahl gerechnet (Shalaby und El-Nady, 2008). Ein Grund kann hier in der Trocknung der Produkte liegen. Diese wurde bei milden Temperaturen (Raumtemperatur: 50°C und über einen längeren Zeitraum (3-10 Tage, vgl. Tabelle 11) durchgeführt. Da die Trocknung nicht unter sterilen Bedingungen durchgeführt wurde, ist es möglich, dass es zu einem Auftreten von Aflatoxin produzierenden Pilzen gekommen ist. Zwar zeigten sich makroskopische keine Anzeichen für einen Pilzbefall, aber der Landwirtschaft ist die Keimungshemmende Wirkung von Aflatoxinen beim Mais gut bekannt (Misra und Tripathi, 1980). Andere Gründe, wie z.B. hemmende Wirkung von Schwermetallen/Schadstoffen in den Hefedüngevarianten aus dem Tank 2 scheinen ausgeschlossen, da auch die Brauhefen eine stark verringerte Keimfähigkeit hervorrufen. Eine andere Trocknung (höhere Temperaturen (180°C, Punkt 5.3.3.2) und kurze Trocknungszeit bzw. Sprühtrocknung des Produktes sollten hier Abhilfe schaffen.

Fazit: Die meisten Parameter zeigen eine vergleichbare Wirkung von den Hefedüngern und dem mineralischen Dünger Superphosphat (Tabelle 11, grüne Werte). Bei vielen Parametern (z.B. Gehalt an Phosphor und Kalium) liegen die Hefedüngevarianten sogar über dem mineralischen Dünger (Tabelle 11, dunkelgrüne Werte). Lediglich die Keimfähigkeit der Pflanzen bleiben auf beiden Böden hinter der Erwartung zurück. Generell ist der V-Boden deutlich besser für das Wachstum der getesteten Maissorte geeignet, als der D-Boden, unabhängig vom getesteten Düngemittel.

5.6 Qualitätstests/Schadstoffuntersuchungen (AP16)

Von den in Punkt 5.3.1 genutzten Substrate (Überschussschlamm, Faulschlamm und Klärschlamm) und den unter Punkt 5.3.2 hergestellten Produkten aus Hefen + Substrat: Überschussschlamm, Trübwasser, Faulschlamm und Klärschlamm wurden getrocknete Proben (~200 g TM) an die Firma Agrolab GmbH gesendet, um die Nähr- und Schadstoffe untersuchen zu lassen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 13 zu finden. Alle nach DÜMV gelisteten Schwermetalle und Pathogene (Salmonellen) sind in den eingesetzten Substraten (entwässerte Hefe, Überschussschlamm, Faulschlamm und Klärschlamm) unter der Nachweisgrenze und bei den Produkten (Überschussschlamm, Trübwasser, Faulschlamm und Klärschlamm) deutlich unter den Grenzwerten. Sowohl die eingesetzten entwässerten Hefen (Substrat 2), als auch die Produkte 2 (geerntete Hefen nach Behandlung von Überschussschlamm, Trübwasser, Faulschlamm und Klärschlamm) weisen Gehalte an Gesamtstickstoff (Substrate MW: 79,33 g/kg TM, Produkte MW: 58,75 g/kg TM) auf, die nach der DÜMV angegeben werden müssen. Ebenso verhält es sich mit Kalium (Substrate MW 25,5 g/kg TM, Produkte MW: 14,84 g/kg TM) und Eisen. Bei Eisen sind es die Produkte aus den Faulschlämmen, Klärschlämmen und des Überschussschlammes 1, die über der Grenze für die Gehaltsangabe der DÜMV (>10 g/kg) liegen. Im Mittel sind es bei den 3 Produkten 28,12 g/kg TM, während es bei den anderen Produkten aus Trübwasser und Überschussschlamm 2 nur ~ 0,6 g Fe/kg TM sind.

Die Arzneimittel Ciprofloxacin, Levofloxacin, Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac, Cefuroxim, Sulfamethoxazol, Metoprolol und Bezafibrat wurden ebenfalls in den Substraten und den geernteten Hefen (Produkt 2) untersucht. Dabei wurde im Substrat Überschussschlamm 2 Ciprofoxacin ($10 \mu\text{g/kg TM}$) gefunden, im Substrat Faulschlamm 2 Carbamazepin ($121 \mu\text{g/kg TM}$), Diclofenac ($131 \mu\text{g/kg TM}$) und Metoprolol ($258 \mu\text{g /kg TM}$) und im Klärschlamm 2 Metoprolol ($104 \mu\text{g /kg TM}$). Diese Konzentrationen sind wesentlich geringer, als die in der UBA-Studie 2019 für Faulschlamm und Klärschlamm genannten Konzentrationen (UBA, 2019). In der Studie wurde eine starke Abreicherung von Arzneistoffen in den Produkten gegenüber denn Ausgangsstoffen festgestellt. In den aus Tank 2 geernteten Produkt wurde lediglich bei Klärschlamm 1 Clarithromycin ($23 \mu\text{g/kg TM}$) und Metoprolol ($342 \mu\text{g/kg TM}$) detektiert. Alle anderen Arzneistoffe lagen unterhalb der Nachweisgrenzen. Insgesamt ist also auch hier eine Abreicherung von Substrat zu Produkt zu verzeichnen. Unklar ist, wo die Arzneistoffe Clarithromycin und Metoprolol im Produkt 2 herkommen, da im entsprechenden Substrat 1 die beiden Arzneistoffe unterhalb der Detektionsgrenze lagen. Im Gegensatz zu Ciprofloxacin und Levofloxacin ist bisher kein Adsorptionsverhalten von Metoprolol und Clarithromycin an der Feststoffmatrix nachgewiesen (UBA, 2019). Dahe bedarf es weiterer Untersuchungen, um eine Akkumulation von Metoprolol und Clarithromycin im Produkt 2 auszuschließen.

Tabelle 13. Nährstoff, Schadstoff und Pathogengehalte der Substrate (keine Bestimmung für Trübwasser 1 und 2 und Überschussschlamm 1, da zu wenig Trockenmasse für Bestimmung verfügbar) und Produkte. n.d.: nicht detektierbar, n.g.: nicht getestet

		Unbehandeltes Substrat (Schlämme und Wässer in Tank 1)							
		Trübwasser 1	Trübwasser 2 ^{o3}	Faulschlamm 1	Faulschlamm 2	Klärschlamm 1	Klärschlamm 2	Überschussschlamm 1 ^{o1}	Überschussschlamm 2 ^{o2}
C/N					8	7,6	7,3		
Wassergehalt	g/kg TM				5,3	1,7	2,7		
Organische Susbtanz	g/kg TM				437	425	429		
Glührückstand	g/kg TM				563	575	571		
Stickstoff-Gesamt	g/kg TM				32	33	34		
Ammoniumstickstoff	g/kg TM				n.d.	n.d.	n.d.		
Gesamtposphat	g/kg TM			29,04	24,2	22	22,44		26,4
Kalium	g/kg TM				6,9	1,8	2,3		
Calcium	g/kg TM				61	62	63		
Magnesium	g/kg TM				7	6,1	5,8		
Schwefel-Gesamt	g/kg TM				9,2	9,6	9,8		
Natrium	g/kg TM				9,7	6,3	4,9		
Fe	g/kg TM				32	32,3	32,6		
Mn	g/kg TM				0,339	0,339	0,341		
As	g/kg TM				0,0038	0,0040	0,0039		
Pb	g/kg TM				0,0116	0,0130	0,0127		
Cd	g/kg TM				0,0004	0,0005	0,0004		
Cr	g/kg TM				0,0339	0,0377	0,0377		
Cr VI	g/kg TM				n.d.	n.d.	n.d.		
Ni	g/kg TM				0,0182	0,0199	0,0195		
Hg	g/kg TM				0,0002	0,0003	0,0002		
Tl	g/kg TM				n.d.	n.d.	n.d.		
PAK	g/kg TM								
PFC, PCB	g/kg TM								
Salmonella	in 50 g				n.d.	n.d.	n.d.		

Fortsetzung Tabelle 13. n.d.: nicht detektierbar, n.g.: nicht getestet

		Substrat 2 (entwässerte Hefe vor Einsatz in Tank2)							
		Trübwasser 1	Trübwasser 2 ^{o3}	Faulschlamm 1	Faulschlamm 2	Klärschlamm 1	Klärschlamm 2	Überschussschlamm 1 ^{o1}	Überschussschlamm 2 ^{o2}
C/N		7,2	7,2	6,3	7,6	7,1	6,6	6,3	6,3
Wassergehalt	g/kg TM	3,4	3,4	2,9	11,2	2,3	1,2	3,6	2,9
Organische Susbtanz	g/kg TM	927	927	922	930	923	921	918	922
Glührückstand	g/kg TM	74	74	79	69	77	79	82	79
Stickstoff-Gesamt	g/kg TM	75	75	85	71	76	81	85	85
Ammoniumstickstoff	g/kg TM	3,1	3,1	3,1	n.d.	2,7	2	2,6	3,1
Gesamtposphat	g/kg TM	14,52	14,52	16,28	14,08	14,96	15,4	16,72	16,28
Kalium	g/kg TM	24	24	27	24	27	26	27	27
Calcium	g/kg TM	4	4	4	2	4	5	4	4
Magnesium	g/kg TM	4	4	4,1	3,7	3,8	3,9	4,5	4,1
Schwefel-Gesamt	g/kg TM	3	3	4,1	3,7	3,2	3,8	3,7	4,1
Natrium	g/kg TM	1,1	1,1	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Fe	g/kg TM	0,277	0,277	0,100	0,083	0,145	0,089	0,094	0,100
Cu	g/kg TM	0,035	0,035	0,024	0,142	n.d.	n.d.	0,028	0,024
Mn	g/kg TM	0,013	0,013	0,008	0,009	0,008	0,009	0,008	0,008
Zn	g/kg TM	0,082	0,082	0,071	0,047	0,055	0,067	0,065	0,071
As	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Pb	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cd	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cr	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Cr VI	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Hg	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Tl	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PAK	g/kg TM	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
PFC, PCB	g/kg TM	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.
Salmonella	in 50 g	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Fortsetzung Tabelle 13. n.d.: nicht detektierbar, n.g.: nicht getestet

		Produkt 2 (P-angereicherte Hefe aus Tank 2)							
		Trübwasser 1	Trübwasser 2 ^{o3}	Faulschlamm 1	Faulschlamm 2	Klärschlamm 1	Klärschlamm 2	Überschussschlamm 1 ^{o1}	Überschussschlamm 2 o2
C/N		6,4	6,6	7,1	7,2	7,8	7,1	7,7	6,7
Wassergehalt	g/kg TM	1,3	4,2	2	1,3	3,7	1,1	3,9	2,6
Organische Susbtanz	g/kg TM	922	897	628	565	542	444	718	927
Glührückstand	g/kg TM	78	103	372	435	485	556	282	73
Stickstoff-Gesamt	g/kg TM	84	79	51	46	40	36	54	80
Ammoniumstickstoff	g/kg TM	4,2	4,9	2,3	n.d.	n.d.	n.d.	3,4	2,6
Gesamtposphat	g/kg TM	15,84	20,68	22,88	21,12	19,8	23,76	24,64	14,96
Kalium	g/kg TM	25	18	14	12	7,4	6,3	12	24
Calcium	g/kg TM	4	10	42	41	42	55	30	5
Magnesium	g/kg TM	4,2	11	6,6	6,6	5,5	6,3	5,7	3,7
Schwefel-Gesamt	g/kg TM	3,9	3,7	8,5	7,2	8,6	8,8	7,2	4,5
Natrium	g/kg TM	1,2	1,4	6,6	6,5	3,2	4,6	6,5	2,2
Fe	g/kg TM	0,306	0,792	25,300	22,300	26,800	32,800	33,400	0,652
Cu	g/kg TM	0,021	0,009	0,127	0,100	0,111	0,16	0,124	0,012
Mn	g/kg TM	0,011	0,022	0,239	0,219	0,251	0,317	0,277	0,013
Zn	g/kg TM	0,084	0,157	0,457	0,404	0,427	0,57	0,450	0,071
As	g/kg TM	n.d.	n.d.	0,0025	0,0023	0,0026	0,0035	0,0025	n.d.
Pb	g/kg TM	n.d.	n.d.	0,0090	0,0076	0,0117	0,012	0,0066	n.d.
Cd	g/kg TM	n.d.	n.d.	0,0003	0,0003	0,0003	0,0004	0,0003	n.d.
Cr	g/kg TM	n.d.	n.d.	0,0264	0,0242	0,0288	0,0347	0,0228	n.d.
Cr VI	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
Ni	g/kg TM	n.d.	n.d.	0,0135	0,0131	0,0154	0,0179	0,0137	n.d.
Hg	g/kg TM	n.d.	n.d.	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0001	n.d.
Tl	g/kg TM	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
PAK	g/kg TM	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.			n.g.	n.g.
PFC, PCB	g/kg TM	n.g.	n.g.	n.g.	n.g.			n.g.	n.g.
Salmonella	in 50 g	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

Tabelle 14. Pharmazeutische Arzneistoffe in Substraten (Tank 1) und Produkt 2 aus Tank 2. Substrate von Trübwasser 1 und 2, sowie Faul- und Überschussschlamm 1 und Produkt 2 von Trübwasser 1 und Faulschlamm 1 wurden aufgrund geringer Probemengen nicht analysiert.

Parameter		Substrat (Tank 1)							
		Trübwasser 1 ⁰³	Trübwasser 2	Faulschlamm 1	Faulschlamm 2	Klärschlamm 1	Klärschlamm 2	Überschussschlamm 1 ⁰¹	Überschussschlamm 2 ⁰²
		µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM
Clarithromycin	Makrolid-Antibiotikum				<11	<10	<10		10
Ciprofloxacin	Fluorchinolon-Antibiotikum				<500	<500	<500		<500
Cefuroxim	β-Lactam-Antibiotikum				<125	<12.5	<125		<125
Levofloxacin	Fluorchinolon-Antibiotikum				<250	<250	<250		<250
Carbamazepin	Antikonvulsivum				121	<250	<250		<250
Diclofenac	nicht-steroidales Antirheumatikum				131	<50	<50		<69
Sulfamethoxazol	Sulfonamid-Antibiotikum				<50	<50	<50		<250
Metoprolol	Betablocker				258	<250	104		<250
Bezafibrat	Lipidsenker				<5	<50	<50		<25
Parameter		Produkt 2 aus Tank 2 nach Ernte							
		Trübwasser 1 ⁰³	Trübwasser 2	Faulschlamm 1	Faulschlamm 2	Klärschlamm 1	Klärschlamm 2	Überschussschlamm 1 ⁰¹	Überschussschlamm 2 ⁰²
		µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM	µg/kg TM
Clarithromycin	Makrolid-Antibiotikum		<10		<10	23	<5	<50	<50
Ciprofloxacin	Fluorchinolon-Antibiotikum		<25		<500	<500	<25	<500	<500
Cefuroxim	β-Lactam-Antibiotikum		<125		<125	<125	<125	<125	<125
Levofloxacin	Fluorchinolon-Antibiotikum		<250		<250	<250	<250	<250	<250
Carbamazepin	Antikonvulsivum		<50		<250	<50	<50	<250	<250
Diclofenac	nicht-steroidales Antirheumatikum		<50		<50	<50	<50	<50	<50
Sulfamethoxazol	Sulfonamid-Antibiotikum		<50		<250	<50	<50	<250	<250
Metoprolol	Betablocker		<50		<250	342	<50	<250	<250

On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage

Bezafibrat	Lipidsenker		<50		<50	<50	<50	<50	<50
------------	-------------	--	-----	--	-----	-----	-----	-----	-----

6. Zusammenfassung der Ergebnisse

Ziel des Projektes war der Aufbau und Betrieb einer Pilotanlage zur Rückgewinnung von free P aus den Schlämmen und Wässern einer Kläranlage unter Einsatz von Brauhefen als Phosphatakkumulierer. Dieses Ziel wurde erreicht. Die Ziele der Arbeitspakete 1-5 (Modul Planung, Aufbau und Testung) wurden abgeschlossen und bereits im Zwischenbericht erläutert. In den APs 7-11 wurde das Modul dann unter den Gegebenheiten der Kläranlage getestet und der Betrieb optimiert. In diesen Arbeitspaketen geerntete Produkte wurden in den APS 15 und 16 hinsichtlich ihrer Qualität untersucht. Die Kläranlage selbst wurde in den APs 12-14 auf Stabilität und P-Verfügbarkeit untersucht. Die beiden Sensoren der Firma Centec (Dichte- und Ultraschallsensor) wurden in das Modul integriert und haben, soweit möglich, die Versuche in Tank 2 begleitet (AP6).

Allerdings kam es in den Arbeitspaketen 7-11 bedingt durch die SARS-CoV-2 Einschränkungen zu zeitlichen und inhaltlichen Abweichungen vom geplanten Projektverlauf, so dass nicht alle Versuche in mindestens 3facher oder mehrfacher Ausführung und auch nicht die Mischversuche durchgeführt werden konnten. Durch betriebliche Probleme mit der Pilotanlage, die vor Hochskalierung des Laborbetriebes nicht erwartet wurden wie z.B: die intensive Schaumbildung durch die Belüftungseinheit und das Absinken der Hefezellen wurden auch weniger Produkte als geplant für die Untersuchung der Düngewirkung getestet. Dennoch können folgende Aussagen zu der Pilotanlage, den eingesetzten Substraten und den daraus gewonnenen Produkten gemacht werden:

Tank 1: Die Freisetzung von P aus den Schlämmen funktioniert gut. In allen Schlämmen, die durch die P-Balance empfohlen worden sind, ist die ökonomisch machbare Konzentration von $0,05 \text{ kg freies P/m}^3$ erreicht worden. Bei Überschussschlamm werden 4h - 48 Stunden benötigt um $0,05 \text{ kg free P/m}^3$ zu überschreiten, während bei Faulschlamm und Klärschlamm 2 Stunden unter langsamen Rühren ausreichen, um den free P-Gehalt stark zu erhöhen. Trübwasser kann sogar ohne vorherige Behandlung in Tank 1 genutzt werden, da sich der P-Gehalt nicht verändert.

Tank 2: Die Überführung des Substrates (Supernatant der Schlämme und Wässer) von Tank 1 in Tank 2 erfolgt innerhalb von 15 min. Die Entwässerung der Hefen vor dem Einsatz in Tank 2 ist ausschlaggebend für die Effizienz des Verfahrens, da dadurch ein zusätzlicher Eintrag von free P vermieden wird. Besonderes Augenmerk sollte auf die Einbringung der Hefe und deren Homogenisierung gerichtet werden, um ein vorschnelles Absinken der Zellen vor Einsatz der Belüftung zu verhindern. Um Schaumbildung wirkungsvoll zu unterbinden, reicht die Zufuhr von 2,5-10 ml Salatöl pro kg zugesetzter Hefe-Frischmasse zu Beginn des Versuches aus. Obwohl die größte Reduktion von free P bereits während der ersten 30 Minuten stattfindet, wird eine Versuchsdauer von mindestens 4 h empfohlen. Diese Zeit reicht aus, um bis zu 75% free P zu entfernen. Die durchschnittliche free P-Reduktion im Substrat 1 Supernatant beträgt $0,047 \text{ kg/m}^3$, die durchschnittliche Akkumulation im Produkt 2 Hefe $13,53 \text{ g P/kg TM}$ (indirekte Berechnung) und $5,12 \text{ gP/kg TM}$ (direkte Messung).

Damit könnten durch den wiederholten Einsatz des Moduls oder eine Up-Scalierung die Vorgaben der Klärschlammverordnung von $\text{P} < 20 \text{ g/kg TM}$ für den Klärschlamm eingehalten werden (AbfKlärV, 2017).

Hefeernte: Es ist zu beachten, dass die Partikelanteile im Supernatant in allen untersuchten Schlämmen und Wässern und insbesondere im Faulschlamm und Klärschlamm sehr hoch waren. Inwieweit dadurch

die Ernte der Hefe beeinträchtigt wird muss weiter untersucht werden. Der Einsatz eines Big Bags erleichtert und verkürzt die Hefeernte. Sofern außer der Hefe nur wenig Partikel in der Lösung vorhanden sind, beträgt die Zeit von der Abschaltung der Belüftung bis zur Ernte nur rund 30 Minuten. Die anschließende Trocknung des Produktes sollte schnell erfolgen.

Pflanzenverfügbarkeit: Der geerntete Phosphor ist gut pflanzenverfügbar und unterstützt das Wachstum auf Diluvial- und Verwitterungsboden. Zwar ist die Keimfähigkeit niedriger als bei dem mineralischen Dünger Superphosphat, die Gehalte an Nährstoffen wie P, K und Mg, Stärke, ELOS und Zucker liegen jedoch teilweise deutlich über der mineralischen Kontrolle.

Nähr- und Schadstoffgehalt:

Alle Produkte enthalten einen Anteil an N, K und P, der nach DÜMV deklariert werden muss. Jedoch liegen alle Schadstoffe und Pathogene deutlich unter den Grenzwerten, die durch die DÜMV vorgegeben werden. Eisen ist ein signifikanter Bestandteil von Produkten mit hohen P-Lasten (Faulschlamm, Klärschlamm und betriebsbedingt Belebtschlamm- und Überschussschlamm). Gegenüber den eingesetzten Substraten ist ein je nach angewandter Messmethode (indirekte Berechnung oder direkte Messung nach Produkternte und Trocknung) ein mehr oder weniger deutlicher Anstieg in dem P-Gehalt der Produkte sichtbar. Die Arzneimittel Ciprofloxacin, Levofloxacin, Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac, Cefuroxim, Sulfamethoxazol, Metoprolol und Bezafibrat wurden ebenfalls in den Substraten und den geernteten Produkt untersucht. Sowohl die Substrate, als auch die Produkte (Faulschlamm, Klärschlamm und Überschussschlamm) zeigen sehr geringe Konzentrationen von Clarithromycin, Carbamazepin, Diclofenac und Metoprolol. In dem Produkt 2 konnte nur bei einem Produkt aus Klärschlamm Ciprofloxacin und Metoprolol nachgewiesen werden.

Aus jetziger Sicht ist bei der Anwendung der Produkte auf den Feldern von einer Unbedenklichkeit gegenüber Boden und Nutzpflanzen auszugehen.

Sensorvermittelte P-Messung:

Bei den Tests zur Sensor gesteuerten Überwachung des Aufnahmeprozesses in Tank 2 zeigte sich, dass bei der Bestimmung des free P sehr nah an den mit einer chemischen Methode bestimmten Werten liegen (Abweichung 0,002-0,004 kg/m³). Auch das bound P kann gut dargestellt werden, jedoch mit einer höheren Abweichung zu den chemisch gemessenen Werten (Abweichung 0,006-0,037 kg/m³). Eine Reduzierung des Eintrages von Luftblasen kann zu einer weiteren Erhöhung der Bestimmungsgenauigkeit beitragen und die Einsetzbarkeit auch auf andere Stellen der Kläranlage, die bisher von chemischen Messsystemen überwacht werden (Zulauf, Ablauf), geprüft werden.

7. Literatur

- AbfKlärV, Klärschlammverordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465), die zuletzt durch Artikel 6 der Verordnung vom 27. September 2017 (BGBl. I S. 3465) geändert worden ist
- AbwV 2020, Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 16. Juni 2020 (BGBl. I S. 1287) geändert worden ist
- BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.) Stellungnahme: Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (Stand 31. August 2015), Berlin, 29. Oktober 2015.
- Blackall L.L., Crocetti G.R., Saunders A.M., Bond P.L. (2002) A review and update of the microbiology of enhanced biological phosphorus removal in wastewater treatment plants. *Antonie van Leeuwenhoek* 81: 681–691.
- Car, D., Lewin-Koh, N., Maechler, M., Sarkar, D., 2019. Hexbin: Hexagonal Binning Routines. R package version 1.27.2.
- Carliell-Marquet C.M., Wheatley A.D. (2002). Measuring metal and phosphorus speciation in P-rich anaerobic digesters. *Water Science and Technology* 45:305–312.
- Christ J.J., Blank L.M. *Saccharomyces cerevisiae* containing 28% polyphosphate and production of a polyphosphate-rich yeast extract thereof. *FEMS Yeast Res.* 2019 May 1;19(3). pii: foz011. doi: 10.1093/femsyr/foz011.
- Cichocki, N., Hübschmann, T., Schattenberg, F., Kerckhof, F.M., Overmann, J., Müller, S., 2020. Bacterial Mock Communities as Standards for Reproducible Cytometric Microbiome Analysis. *Nat. Protoc.* DOI: 10.1038/s41596-020-0362-0, on-line
- Cornel, P., Schaum, C., 2009. Phosphorus Recovery from Wastewater: Needs, Technologies and Costs. *Water Sci. Technol.*, 59, 1069-76. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.045>
- Cousineau D., Chartier, S. (2010). Outliers detection and treatment: a review. *International Journal of Psychological Research*, 3 (1), 58-67.
- Cydzik-Kwiatkowska, A., Nosek, D. 2020. Biological release of phosphorus is more efficient from activated than from aerobic granular sludge. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67896-5>
- de Haas, D.W., Wentzel, M.C., Ekama, G.A., 2001. The Use of Simultaneous Chemical Precipitation in Modified Activated Sludge Systems Exhibiting Biological Excess Phosphate Removal Part 5: Experimental Periods Using a Ferrous-ferric Chloride Blend. *Water SA*, 27(2), 117-134. DOI: 10.4314/wsa.v27i2.4987
- de Haas, D.W., Wentzel, M.C., Ekama, G.A., 2001. The Use of Simultaneous Chemical Precipitation in Modified Activated Sludge Systems Exhibiting Biological Excess Phosphate Removal Part 6: Modelling of Simultaneous Chemical-Biological P Removal - Review of Existing Models. *Water SA*, 27(2), 135-150. DOI: 10.4314/wsa.v27i2.4988
- Dienemann C., Utermann J. *Uran in Boden und Wasser*. UBA 2012: <http://www.uba.de/uba-info-medien/4336.html>.
- DÜMV 2019. Düngemittelverordnung vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 2. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414) geändert worden ist.
- EU (2020) COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Critical Raw Materials Resilience: Charting a Path towards greater Security and Sustainability. COM/2020/474 final
- Gu, Z., Gu, L., Eils, R., Schlesner, M., Brors, B., 2014. Circlize Implements and Enhances Circular Visualization in R. *Bioinformatics*, 30, 2811-2. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btu393>
- Günther S., Faust K., Schumann J., Harms H., Raes J., Müller S. (2016) Species-sorting and mass-transfer paradigms control managed natural metacommunities. *Environmental Microbiology* 2016, doi: 10.1111/1462-2920.13402.
- Günther, S., Grunert, M. and Müller, S. (2018), Overview of recent advances in phosphorus recovery for fertilizer production. *Eng. Life Sci.*, 18: 434-439. <https://doi.org/10.1002/elsc.201700171>
- Hahne, F., LeMeur, N., Brinkman, R.R., Ellis, B., Haaland, P., Sarkar, D., Spidlen, J., Strain, E., Gentleman, R., 2009. flowCore: a Bioconductor Package for High Throughput Flow Cytometry. *R Package Version 1.52.1. BMC Bioinformatics*, 10, 106. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-10-106>
- Harrell, F.E., Dupont, C. et al. , 2018. Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 4.1-1.

- Heuzé, V., Thiollé, H., Tran, G., Edouard, N., Lessire, M., Lebas, F., 2018. Brewers yeast. Feedipedia, a programme by INRAE, CIRAD, AFZ and FAO. <https://www.feedipedia.org/node/72> Last updated on December 13, 2018.
- Hijmans, R., van Etten, J., 2014. Raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version 3.0-7. R Package Version 2014; 517, 2-12.
- Koch, C., Fetzner, I., Schmidt, T., Harms, H., Müller, S., 2013. Monitoring Functions in Managed Microbial Systems by Cytometric Bar Coding. Environ. Sci. Technol., 47, 1753-1760. <https://doi.org/10.1021/es3041048>
- Misra, R.S., Tripathi, R.K., 1980. Effect of aflatoxin B₁ on germination, respiration and α -amylase in maize. Journal of Plant Diseases and Protection, Vol. 87, No. 3, pp. 155-160.
- Montag, D.M. *Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung – Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen*. Dissertation der Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 2008.
- Oksanen, J., Blanchet, F.G., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P., O'Hara, B., Simpson, G.L., Solymos, P., Stevens, H.M.H., Sjoecs, E. Wagner, H., 2015. Vegan: Community Ecology Package. R Package Version 2.2-1 2015; 2: 1-2.
- RCoreTeam., 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria
- Shalaby M.E., El-Nady M.F. (2008) Application of *Saccharomyces cerevisiae* as a biocontrol agent against *Fusarium* infection of sugar beet plants. Acta Biologica Szegediensis, 52:271-275.
- Spellman, F.R., (1996). Wastewater Biosolids to Compost. United States, Bosa Roca, p.p. 72. ISBN 9781566764612
- Strom, P.F. (2006). Technologies to Remove Phosphorous from Wastewater. Pdf: <http://www.water.rutgers.edu/Projects/tradit ng/p-trt-lit-rev-2a.pdf>. (Download 19.06.2019).
- Umweltbundesamt (2015) Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz; TEXTE 98/2015; Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 3713 26 301 UBA-FB 002120.
- Umweltbundesamt (2019) Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen; Texte 31/2019; Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit Forschungskennzahl 3715 33 401 UBA-FB 002724.
- Vagabov, V. M., Trilisenko, L. V., Kulaev, I. S. (2000). Dependence of Inorganic Polyphosphate Chain Length on the Orthophosphate Content in the Culture Medium of the Yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Biochemistry (Moscow), Vol. 65, No. 3, pp. 349-354.
- Vučić a: Vučić, V., Süring, C., Harms, H., Müller, S., Günther, S. (2021) A framework for P-cycle assessment in wastewater treatment plants. Sci Total Environ, 760, 143392, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143392.
- Vučić b: Vučić, V., Müller, S. (2021) New developments in biological phosphorus accessibility and recovery approaches from soil and waste streams. Eng Life Sci., 21: 77– 86. <https://doi.org/10.1002/elsc.202000076>
- Walfish S. (2006). A Review of Statistical Outlier Methods. Pharmaceutical Technology, 30 (11), 82.
- Walker, G.M., Stewart, G.G. (2016) *Saccharomyces cerevisiae* in the production of fermented beverages. Beverages, 2(4). 30. <https://doi.org/10.3390/beverages2040030>
- Wickham, H., 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag, New York. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24277-4>
- Yilmaz, G., Cetin, E., Bozkurt, U., Magden, K., 2017. Effects of Ferrous Iron on the Performance and Microbial Community in Aerobic Granular Sludge in Relation to Nutrient Removal. Biotechnol. Prog., 33. <https://doi.org/10.1002/btpr.2456>

Anhänge

- (1) Veröffentlichungen und Links zu den veröffentlichten Artikeln über das Projekt
- (2) Originaldatenblätter der Nähr- und Schadstoffuntersuchungen
- (3) Originaldatenblätter der Untersuchungen zu den Arzneimittelrückständen

Anhang 2: Publikationen und Links zu den veröffentlichten Artikeln über das Projekt

Publikationen:

Vučič V, Süring C, Harms H, Müller S, Günther S.
A framework for P-cycle assessment in wastewater treatment plants.
Science of the Total Environment (2021) 760C, 143392.

Günther S, Grunert M, Müller S.
Recent advances in phosphorous recovery.
Engineering in Life Sciences, (2018) 18, 434-439.

Vučič V & Müller S.
New developments in biological phosphorus accessibility and recovery approaches from soil and waste streams.
Engineering in Life Sciences, (2021) 21, 77-86.

Links:

- LVZ | 06.06.2018

<https://www.lvz.de/Region/Eilenburg/Eilenburger-Klaerwerk-Experten-wollen-aus-Schlamm-Phosphor-gewinnen>

- LVZ | 24.01.2021

<https://www.lvz.de/Region/Mitteldeutschland/Leipziger-Forscherinnen-suchen-Phosphat-Gold-im-Eilenburger-Abwasser>

- Dresdner Morgenpost | 31.01.2021, tag24.de:

<https://www.tag24.de/thema/wissenschaft-forschung/na-wer-sagt-s-denn-selbst-brauerei-abfaelle-sind-noch-gut-fuer-die-umwelt-1819674>



WESSLING GmbH, Oststr. 7, 48341 Altenberge

Abwasserzweckverband Mittlere Mulde
Herr Wolf
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Geschäftsfeld: Wasser
Ansprechpartner: K. Dexheimer
Durchwahl: +49 2505 89 153
E-Mail: Kai.Dexheimer@wessling.de

Prüfbericht

Prüfbericht Nr.: CAL21-048775-1

Datum: 30.03.2021

Auftrag Nr.: CAL-04530-21

Auftrag: Analytik von Arzneimittelrückständen in P-Rezyklaten:
Projekt-Nr. 33960/01-32 DBU-Projekt

Kai Dexheimer
Leiter Geschäftsfeld Wasser



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAkKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weißling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt

**Probeninformation**

Probe Nr.	21-030029-01
Bezeichnung	Probennummer 3, CE2.2
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-01	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	<10	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<25	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weißling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt

Probeninformation

Probe Nr.	21-030029-02
Bezeichnung	Probennummer 5, EX1.2
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-02	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	<50	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<500	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

**Probeninformation**

Probe Nr.	21-030029-03
Bezeichnung	Probennummer 7, EX2.2
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-03	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	<50	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<500	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit ^A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weißling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt

**Probeninformation**

Probe Nr.	21-030029-04
Bezeichnung	Probennummer 10, AD 2.2
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-04	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	<10	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<500	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weßling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt

**Probeninformation**

Probe Nr.	21-030029-05
Bezeichnung	Probennummer 12, BS 1.2
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-05	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	23	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<500	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	342	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weißling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt

Probeninformation

Probe Nr.	21-030029-06
Bezeichnung	Probennummer 14, BS 2.2
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-06	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	<5	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<25	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

**Probeninformation**

Probe Nr.	21-030029-07
Bezeichnung	Probennummer 15, BS 1.3
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-07	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	<10	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<500	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<12,5	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weißling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt

Probeninformation

Probe Nr.	21-030029-08
Bezeichnung	Probennummer 16, BS 2.3
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-08	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	<10	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<500	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	104	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

**Probeninformation**

Probe Nr.	21-030029-09
Bezeichnung	Probennummer 17, AD 2.3
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-09	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	<11	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<500	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	121	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	131	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<50	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	258	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<5	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weißling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt

**Probeninformation**

Probe Nr.	21-030029-10
Bezeichnung	Probennummer 18, EX 2.3
Probenart	Feststoff allgemein
Probenahme durch	Auftraggeber
Probengefäß	PP Beutel
Anzahl Gefäße	1
Eingangsdatum	23.02.2021
Untersuchungsbeginn	23.02.2021
Untersuchungsende	30.03.2021

	21-030029-10	Einheit	Bezug	Methode	aS
Clarithromycin	10	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Ciprofloxacin	<500	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Cefuroxim	<125	µg/kg	G-TS	WES 861 (2017-11)	AL
Levofloxacin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Carbamazepin	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Mahlen	09.03.2021			DIN ISO 11464 (2006-12) A	AL
Diclofenac	69	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Sulfamethoxazol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Metoprolol	<250	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL
Bezafibrat	<25	µg/kg	G-TS	WES 860 (2017-11)	AL

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weißling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt



21-030029-08

bis -10

Kommentare der Ergebnisse:

Markierte Parameter P-Recyclate Pharmazeutika: Abweichung von Methode!

Aufgrund starker Zersetzung beim Mikrowellenaufschluss nicht via Mikrowelle aufschließbar. Alternativ wurde die Probe 5h im Ultraschallbad aufgeschlossen.

Legende

aS ausführender Standort **G-TS** Gefriertrockensubstanz **AL** Altenberge



Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14162-01-00

Durch die DAKKS nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiertes Prüflaboratorium. Die Akkreditierung gilt für den in der Urkundenanlage [D-PL-14162-01-00] aufgeführten Akkreditierungsumfang. Akkreditierte Verfahren sind mit ^A gekennzeichnet. Prüfberichte dürfen ohne Genehmigung der WESSLING GmbH nicht auszugsweise vervielfältigt werden. Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die vorliegenden Prüfobjekte.

Geschäftsführer:
Florian Weßling,
Marc Hitzke
HRB 1953 AG Steinfurt

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 EilenburgDatum 26.02.2021
Kundennr. 10087614**PRÜFBERICHT 2847232 - 114698**

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
 Analysenr. 114698
 Probeneingang 03.02.2021
 Probenahme 02.02.2021
 Kunden-Probenbezeichnung 1. CE 1.1

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	7,2	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	3,4	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	89,5	OS	92,7		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	7,1	OS	7,4		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	7,2	OS	7,5		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,30	OS	0,31		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	3,2	OS	3,3		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	2,3	OS	2,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	0,4	OS	0,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,39	OS	0,40		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,29	OS	0,30		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,11	OS	0,11		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	268	OS	277		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	33,3	OS	34,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	12,5	OS	12,9		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	78,7	OS	81,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,07		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,04		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,21		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,18		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,18		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,052		DIN EN 16320 : 2017-05



Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114698

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 18.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114702

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114702
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 2. CE 1.2

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	6,4	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	1,3	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	91,0	OS	92,2		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	7,7	OS	7,8		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	8,3	OS	8,4		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,41	OS	0,42		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	3,6	OS	3,6		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	2,5	OS	2,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	0,4	OS	0,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,41	OS	0,42		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,38	OS	0,39		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,12	OS	0,12		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	302	OS	306		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	21,0	OS	21,3		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	10,9	OS	11,0		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	83,2	OS	84,3		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,03		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,01		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,20		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,07		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,07		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,051		DIN EN 16320 : 2017-05

Seite 1 von 2

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114702

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUF A II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUF A MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 26.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung



Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021

Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114704

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114704
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 3. CE 2.2

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	6,6	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	4,2	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	85,9	OS	89,7		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	9,9	OS	10,3		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	7,6	OS	7,9		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH4-N)	%	0,47	OS	0,49		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P2O5)	%	4,5	OS	4,7		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K2O)	%	1,7	OS	1,8		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	1,0	OS	1,0		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	1,1	OS	1,1		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,35	OS	0,37		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,13	OS	0,14		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	759	OS	792		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	8,29	OS	8,65		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	20,7	OS	21,6		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	150	OS	157		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,09		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,04		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,21		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,22		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,22		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,052		DIN EN 16320 : 2017-05



Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114704

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 18.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung



Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021

Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114706

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114706
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 4. EX 1.1

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	6,3	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	3,6	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	88,5	OS	91,8		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	7,9	OS	8,2		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	8,2	OS	8,5		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,25	OS	0,26		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	3,7	OS	3,8		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	2,6	OS	2,7		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	0,4	OS	0,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,43	OS	0,45		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,36	OS	0,37		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	<0,10	OS	<0,10		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	91,0	OS	94,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	27,1	OS	28,1		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	7,96	OS	8,26		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	62,2	OS	64,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,07		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,04		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,21		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,19		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,19		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,052		DIN EN 16320 : 2017-05



Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114706

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUF 11, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUF 11 MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 18.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114707

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysennr. 114707
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 5. EX 1.2

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	7,7	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	3,9	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	69,0	OS	71,8		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	27,1	OS	28,2		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	5,2	OS	5,4		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,33	OS	0,34		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	5,4	OS	5,6		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	1,2	OS	1,2		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	2,9	OS	3,0		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,55	OS	0,57		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,69	OS	0,72		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,62	OS	0,65		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	32100	OS	33400		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	119	OS	124		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	266	OS	277		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	432	OS	450		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	2,35	OS	2,45		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	6,33	OS	6,59		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,30	OS	0,31		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	21,9	OS	22,8		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	13,2	OS	13,7		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,094	OS	0,098		DIN EN 16320 : 2017-05

Seite 1 von 2

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114707

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUF A II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUF A MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 26.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114708

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114708
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 6. EX 2.1

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	6,3	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	2,9	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	89,5	OS	92,2		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	7,6	OS	7,9		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	8,3	OS	8,5		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,30	OS	0,31		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	3,6	OS	3,7		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	2,7	OS	2,8		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	0,4	OS	0,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,40	OS	0,41		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,40	OS	0,41		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	<0,10	OS	<0,10		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	96,8	OS	99,7		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	22,8	OS	23,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	7,72	OS	7,95		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	69,2	OS	71,3		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,06		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,03		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,21		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,15		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,15		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,051		DIN EN 16320 : 2017-05

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114708

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 18.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114709

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysennr. 114709
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 7. EX 2.2

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	6,7	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	2,6	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	90,3	OS	92,7		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	7,1	OS	7,3		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	7,8	OS	8,0		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,25	OS	0,26		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	3,3	OS	3,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	2,3	OS	2,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	0,5	OS	0,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,36	OS	0,37		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,44	OS	0,45		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,21	OS	0,22		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	635	OS	652		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	11,3	OS	11,6		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	12,3	OS	12,6		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	69,2	OS	71,0		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,05		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,03		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,21		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,13		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,13		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,051		DIN EN 16320 : 2017-05



Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114709

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 26.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114710

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysennr. 114710
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 8. AD 1.2

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	7,1	OS			Berechnung
Wassergehalt	2,0	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	61,5	OS	62,8		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	36,5	OS	37,2		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	5,0	OS	5,1	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,23	OS	0,23	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	5,1	OS	5,2	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	1,4	OS	1,4	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	4,1	OS	4,2	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,65	OS	0,66	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,83	OS	0,85	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,65	OS	0,66	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	24800	OS	25300	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	124	OS	127	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	234	OS	239	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	448	OS	457	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	2,43	OS	2,48	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	8,82	OS	9,00	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,29	OS	0,30	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	25,9	OS	26,4	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	mg/kg	<0,10	OS	<0,10	DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	13,2	OS	13,5	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,15	OS	0,15	DIN EN 16320 : 2017-05

Seite 1 von 2

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114710

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 26.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114712

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114712
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 9. AD 2.1

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	7,6	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	11,2	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	82,6	OS	93,0		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	6,2	OS	6,9		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	6,3	OS	7,1		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	<0,20	OS	<0,23		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	2,8	OS	3,2		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	2,1	OS	2,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	0,2	OS	0,2		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,33	OS	0,37		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,33	OS	0,37		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	<0,10	OS	<0,11		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	73,6	OS	82,9		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	126	OS	142		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	7,87	OS	8,86		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	41,5	OS	46,7		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,25		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,13		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,23		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,63		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,11		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,63		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,056		DIN EN 16320 : 2017-05

Seite 1 von 2

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114712

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,11		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 18.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114713

Auftrag 2847232 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114713
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 10. AD 2.2

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	7,2	OS			Berechnung
Wassergehalt	1,3	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	55,8	OS	56,5		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	42,9	OS	43,5		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	4,5	OS	4,6	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	<0,20	OS	<0,20	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	4,7	OS	4,8	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	1,2	OS	1,2	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	4,0	OS	4,1	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,65	OS	0,66	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,71	OS	0,72	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,64	OS	0,65	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	22000	OS	22300	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	98,9	OS	100	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	216	OS	219	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	399	OS	404	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	2,22	OS	2,25	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	7,48	OS	7,58	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,25	OS	0,25	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	23,9	OS	24,2	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	mg/kg	<0,10	OS	<0,10	DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	12,9	OS	13,1	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,19	OS	0,19	DIN EN 16320 : 2017-05

Seite 1 von 2

Datum 26.02.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847232 - 114713

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen ^{*)}	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
---------------------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021

Ende der Prüfungen: 18.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 17.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114722

Auftrag 2847245 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114722
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 11. BS 1.1

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	7,1	OS			Berechnung
Wassergehalt	2,3	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	90,2	OS	92,3		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	7,5	OS	7,7		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	7,4	OS	7,6	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,26	OS	0,27	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	3,3	OS	3,4	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	2,6	OS	2,7	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	0,4	OS	0,4	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,37	OS	0,38	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,31	OS	0,32	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	<0,10	OS	<0,10	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	142	OS	145	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	<5,00	OS	<5,12	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	7,95	OS	8,14	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	53,8	OS	55,1	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,05	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,02	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,20	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,12	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	mg/kg	<0,10	OS	<0,10	DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,12	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,051	DIN EN 16320 : 2017-05



PRÜFBERICHT 2847245 - 114722

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUF A II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Polychlorierte Dibenzo(p)-dioxine und -furane (PCDD/F)

2,3,7,8-Tetra CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8-Penta CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8-Hexa CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,6,7,8-Hexa CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8,9-Hexa CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,6,7,8-Hepta CDD	ng/kg		TS	<1,0		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
Octa CDD	ng/kg		TS	<2,0		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,7,8-Tetra CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8-Penta CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,4,7,8-Penta CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,6,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8,9-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,4,6,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,6,7,8-Hepta CDF	ng/kg		TS	<0,60		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8,9-Hepta CDF	ng/kg		TS	<0,60		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
Octa CDF	ng/kg		TS	<2,0		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
TCDD-Toxizitätsäquivalente	ng TE/kg		TS	n.b.		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
TE-WHO PCDD/F (2005)	ng TE/kg		TS	0,65		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)

Dioxinlike PCB (dl-PCB)

PCB (105)	ng/kg	<97,7 ^{m)}	OS	<100		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (114)	ng/kg	<48,9	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (118)	ng/kg	<195 ^{m)}	OS	<200		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (123)	ng/kg	<48,9	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (126)	ng/kg	<4,89	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (156)	ng/kg	<48,9	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (157)	ng/kg	<48,9	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (167)	ng/kg	<48,9	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (169)	ng/kg	<4,89	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (189)	ng/kg	<48,9	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (77)	ng/kg	<19,5	OS	<20,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (81)	ng/kg	<4,89	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
TE-WHO dl-PCB (2005)	ng TE/kg	0,66 ^{xx5)}	OS	0,67		Berechnung WHO 2005

Non-dioxinlike PCB (ndl-PCB)

PCB (101)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (138)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (153)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (180)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (28)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (52)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Acenaphthen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Acenaphthylen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Anthracen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(a)-Anthracen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo(a)pyren	ng/kg	<0,0010	OS	<0,0010		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)



PRÜFBERICHT 2847245 - 114722

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Benzo-(b)-Fluoranthren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(ghi)-Perylen	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(k)-Fluoranthren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Chrysen	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Dibenzo-(a,h)-Anthracen	mg/kg	<0,0030	OS	<0,0031		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Fluoranthren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Fluoren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Indeno-(1,2,3-cd)-Pyren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Naphthalin	mg/kg	<0,020	OS	<0,020		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Phenanthren	mg/kg	<0,020	OS	<0,020		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Pyren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
PAK (EPA)	mg/kg	n.b.	OS	n.b.		Berechnung

Perfluorierte Verbindungen (PFC)

Perfluorooctansäure (PFOA)	µg/kg	<5,0	OS	<5,1		DIN 38414-14 (S 14)(OB)
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	µg/kg	<5,0	OS	<5,1		DIN 38414-14 (S 14)(OB)
Summe PFT	µg/kg	<10 ^{x)}	OS			ISO 25101 (mod.) / DIN 38414-14 (S 14)

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
-------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

x) Einzelwerte, die die Nachweis- oder Bestimmungsgrenze unterschreiten, wurden nicht berücksichtigt.

xx) Bei Einzelwerten unter der NWG wurde die Nachweisgrenze und bei Werten zwischen NWG und BG die Bestimmungsgrenze zur Berechnung zugrunde gelegt.

xx5) Bei Einzelwerten unter der BG wurde die Bestimmungsgrenze zur Berechnung zugrunde gelegt.

m) Die Nachweis-, bzw. Bestimmungsgrenze musste erhöht werden, da Matrixeffekte bzw. Substanzüberlagerungen eine Quantifizierung erschweren.

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.

Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz

u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

v) externe Dienstleistung

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg, für die zitierte Methode akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Akkreditierungsverfahren: D-PL-14289-01-00

Methoden

DIN 38414-14 (S 14)

Extern bereitgestellte Dienstleistung durch

(ZF) ZFD, BERNECKERSTR. 17-21, 95448 BAYREUTH, für die zitierte Methode akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Akkreditierungsverfahren: D-PL-19418-01-00

Methoden

AbfklärV 1992; DIN 38414-S 24 (10.00)

Datum 17.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114722

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021
Ende der Prüfungen: 25.02.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.




Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 17.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114723

Auftrag 2847245 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114723
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 12. BS 1.2

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	7,8	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	3,7	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	52,2	OS	54,2		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	44,1	OS	45,8		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	3,9	OS	4,0		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH4-N)	%	<0,20	OS	<0,21		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P2O5)	%	4,3	OS	4,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K2O)	%	0,71	OS	0,74		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	4,0	OS	4,2		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,53	OS	0,55		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,83	OS	0,86		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,31	OS	0,32		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	25800	OS	26800		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	107	OS	111		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	242	OS	251		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	411	OS	427		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	2,53	OS	2,63		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	11,3	OS	11,7		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,30	OS	0,31		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	27,7	OS	28,8		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	14,8	OS	15,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,19	OS	0,20		DIN EN 16320 : 2017-05



Datum 17.03.2021

Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114723

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUF A II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Polychlorierte Dibenzo(p)-dioxine und -furane (PCDD/F)

2,3,7,8-Tetra CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8-Penta CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8-Hexa CDD	ng/kg		TS	0,80		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,6,7,8-Hexa CDD	ng/kg		TS	0,60		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8,9-Hexa CDD	ng/kg		TS	0,80		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,6,7,8-Hepta CDD	ng/kg		TS	29		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
Octa CDD	ng/kg		TS	140		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,7,8-Tetra CDF	ng/kg		TS	1,5		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8-Penta CDF	ng/kg		TS	0,40		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,4,7,8-Penta CDF	ng/kg		TS	0,60		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	0,30		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,6,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8,9-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,4,6,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,6,7,8-Hepta CDF	ng/kg		TS	1,8		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8,9-Hepta CDF	ng/kg		TS	<0,60		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
Octa CDF	ng/kg		TS	3,5		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
TCDD-Toxizitätsäquivalente	ng TE/kg	x)	TS	1,2		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
TE-WHO PCDD/F (2005)	ng TE/kg	xx)	TS	1,4		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)

Dioxinlike PCB (dl-PCB)

PCB (105)	ng/kg	<96,3 m)	OS	<100		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (114)	ng/kg	<48,2	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (118)	ng/kg	<236 m)	OS	<245		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (123)	ng/kg	<48,2	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (126)	ng/kg	<4,82	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (156)	ng/kg	<72,2 m)	OS	<75,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (157)	ng/kg	<48,2	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (167)	ng/kg	<48,2	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (169)	ng/kg	<4,82	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (189)	ng/kg	<48,2	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (77)	ng/kg	<25,0 m)	OS	<26,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (81)	ng/kg	<4,82	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
TE-WHO dl-PCB (2005)	ng TE/kg	0,65 ^{xx5)}	OS	0,67		Berechnung WHO 2005

Non-dioxinlike PCB (ndl-PCB)

PCB (101)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (138)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (153)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (180)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (28)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (52)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Acenaphthen	mg/kg	0,0076	OS	0,0079		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Acenaphthylen	mg/kg	0,0090	OS	0,0093		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Anthracen	mg/kg	0,017	OS	0,018		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(a)-Anthracen	mg/kg	0,053	OS	0,055		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo(a)pyren	mg/kg	0,060	OS	0,062		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)

Datum 17.03.2021

Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114723

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Benzo-(b)-Fluoranthren	mg/kg	0,047	OS	0,049		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(ghi)-Perylen	mg/kg	0,044	OS	0,046		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(k)-Fluoranthren	mg/kg	0,042	OS	0,044		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Chrysen	mg/kg	0,057	OS	0,059		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Dibenzo-(a,h)-Anthracen	mg/kg	0,016	OS	0,017		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Fluoranthren	mg/kg	0,12	OS	0,12		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Fluoren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0052		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Indeno-(1,2,3-cd)-Pyren	mg/kg	0,038	OS	0,039		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Naphthalin	mg/kg	<0,020	OS	<0,021		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Phenanthren	mg/kg	0,068	OS	0,071		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Pyren	mg/kg	0,10	OS	0,10		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
PAK (EPA)	mg/kg	0,68 ^{x)}	OS	0,70		Berechnung

Perfluorierte Verbindungen (PFC)

Perfluorooctansäure (PFOA)	µg/kg	<5,0	OS	<5,2		DIN 38414-14 (S 14)(OB)
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	µg/kg	<5,0	OS	<5,2		DIN 38414-14 (S 14)(OB)
Summe PFT	µg/kg	<10 ^{x)}	OS			ISO 25101 (mod.) / DIN 38414-14 (S 14)

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
-------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

x) Einzelwerte, die die Nachweis- oder Bestimmungsgrenze unterschreiten, wurden nicht berücksichtigt.

xx) Bei Einzelwerten unter der NWG wurde die Nachweisgrenze und bei Werten zwischen NWG und BG die Bestimmungsgrenze zur Berechnung zugrunde gelegt.

xx5) Bei Einzelwerten unter der BG wurde die Bestimmungsgrenze zur Berechnung zugrunde gelegt.

m) Die Nachweis-, bzw. Bestimmungsgrenze musste erhöht werden, da Matrixeffekte bzw. Substanzüberlagerungen eine Quantifizierung erschweren.

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.

Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz

u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

v) externe Dienstleistung

Agrolab-Gruppen-Labore**Untersuchung durch**

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg, für die zitierte Methode akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Akkreditierungsverfahren: D-PL-14289-01-00

Methoden

DIN 38414-14 (S 14)

Extern bereitgestellte Dienstleistung durch

(ZF) ZFD, BERNECKERSTR. 17-21, 95448 BAYREUTH, für die zitierte Methode akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Akkreditierungsverfahren: D-PL-19418-01-00

Methoden

AbfklärV 1992; DIN 38414-S 24 (10.00)

Datum 17.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114723

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021
Ende der Prüfungen: 17.03.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.




Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 17.03.2021

Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114725

Auftrag 2847245 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysennr. 114725
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 13. BS 2.1

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	6,6	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	1,2	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	91,0	OS	92,1		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	7,8	OS	7,9		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	8,0	OS	8,1		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	0,20	OS	0,20		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	3,5	OS	3,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	2,6	OS	2,6		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	0,5	OS	0,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,39	OS	0,39		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,38	OS	0,38		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	<0,10	OS	<0,10		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	87,5	OS	88,6		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	<5,00	OS	<5,06		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	8,75	OS	8,86		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	66,6	OS	67,4		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	<2,00	OS	<2,02		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	<1,00	OS	<1,01		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	<0,20	OS	<0,20		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	<5,00	OS	<5,06		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	<5,00	OS	<5,06		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	<0,050	OS	<0,051		DIN EN 16320 : 2017-05

Seite 1 von 4



Datum 17.03.2021

Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114725

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUF A II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Polychlorierte Dibenzo(p)-dioxine und -furan (PCDD/F)

2,3,7,8-Tetra CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8-Penta CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8-Hexa CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,6,7,8-Hexa CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8,9-Hexa CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,6,7,8-Hepta CDD	ng/kg		TS	<1,0		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
Octa CDD	ng/kg		TS	<2,0		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,7,8-Tetra CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8-Penta CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,4,7,8-Penta CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,6,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8,9-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,4,6,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,6,7,8-Hepta CDF	ng/kg		TS	<0,60		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8,9-Hepta CDF	ng/kg		TS	<0,60		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
Octa CDF	ng/kg		TS	<2,0		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
TCDD-Toxizitätsäquivalente	ng TE/kg		TS	n.b.		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
TE-WHO PCDD/F (2005)	ng TE/kg		TS	0,65		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)

Dioxinlike PCB (dl-PCB)

PCB (105)	ng/kg	<98,8 ^{m)}	OS	<100		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (114)	ng/kg	<49,4	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (118)	ng/kg	<198 ^{m)}	OS	<200		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (123)	ng/kg	<49,4	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (126)	ng/kg	<4,94	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (156)	ng/kg	<49,4	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (157)	ng/kg	<49,4	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (167)	ng/kg	<49,4	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (169)	ng/kg	<4,94	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (189)	ng/kg	<49,4	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (77)	ng/kg	<19,8	OS	<20,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (81)	ng/kg	<4,94	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
TE-WHO dl-PCB (2005)	ng TE/kg	0,66 ^{xx5)}	OS	0,67		Berechnung WHO 2005

Non-dioxinlike PCB (ndl-PCB)

PCB (101)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (138)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (153)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (180)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (28)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (52)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Acenaphthen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Acenaphthylen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Anthracen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(a)-Anthracen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo(a)pyren	ng/kg	<0,0010	OS	<0,0010		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)



PRÜFBERICHT 2847245 - 114725

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Benzo-(b)-Fluoranthren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(ghi)-Perylen	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(k)-Fluoranthren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Chrysen	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Dibenzo-(a,h)-Anthracen	mg/kg	<0,0030	OS	<0,0030		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Fluoranthren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Fluoren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Indeno-(1,2,3-cd)-Pyren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Naphthalin	mg/kg	<0,020	OS	<0,020		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Phenanthren	mg/kg	<0,020	OS	<0,020		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Pyren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
PAK (EPA)	mg/kg	n.b.	OS	n.b.		Berechnung

Perfluorierte Verbindungen (PFC)

Perfluorooctansäure (PFOA)	µg/kg	<5,0	OS	<5,1		DIN 38414-14 (S 14)(OB)
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	µg/kg	<5,0	OS	<5,1		DIN 38414-14 (S 14)(OB)
Summe PFT	µg/kg	<10 ^{x)}	OS			ISO 25101 (mod.) / DIN 38414-14 (S 14)

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
-------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

x) Einzelwerte, die die Nachweis- oder Bestimmungsgrenze unterschreiten, wurden nicht berücksichtigt.

xx) Bei Einzelwerten unter der NWG wurde die Nachweisgrenze und bei Werten zwischen NWG und BG die Bestimmungsgrenze zur Berechnung zugrunde gelegt.

xx5) Bei Einzelwerten unter der BG wurde die Bestimmungsgrenze zur Berechnung zugrunde gelegt.

m) Die Nachweis-, bzw. Bestimmungsgrenze musste erhöht werden, da Matrixeffekte bzw. Substanzüberlagerungen eine Quantifizierung erschweren.

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.

Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz

u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

v) externe Dienstleistung

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg, für die zitierte Methode akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Akkreditierungsverfahren: D-PL-14289-01-00

Methoden

DIN 38414-14 (S 14)

Extern bereitgestellte Dienstleistung durch

(ZF) ZFD, BERNECKERSTR. 17-21, 95448 BAYREUTH, für die zitierte Methode akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Akkreditierungsverfahren: D-PL-19418-01-00

Methoden

AbfKlärV 1992; DIN 38414-S 24 (10.00)

Datum 17.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114725

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021
Ende der Prüfungen: 17.03.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.




Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 17.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114726

Auftrag 2847245 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 114726
Probeneingang 03.02.2021
Probenahme 02.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 14. BS 2.2

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	7,1	OS			Berechnung
Wassergehalt	1,1	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	43,9	OS	44,4		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	55,0	OS	55,6		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	3,6	OS	3,6	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	<0,20	OS	<0,20	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	5,3	OS	5,4	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	0,62	OS	0,63	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	5,4	OS	5,5	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,62	OS	0,63	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,87	OS	0,88	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,45	OS	0,46	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	32400	OS	32800	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kupfer (Cu)	mg/kg	158	OS	160	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	314	OS	317	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Zink (Zn)	mg/kg	564	OS	570	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	3,42	OS	3,46	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	11,9	OS	12,0	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,35	OS	0,35	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	34,3	OS	34,7	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	mg/kg	<0,10	OS	<0,10	DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	17,7	OS	17,9	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,19	OS	0,19	DIN EN 16320 : 2017-05



PRÜFBERICHT 2847245 - 114726

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUF A II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Polychlorierte Dibenzo(p)-dioxine und -furane (PCDD/F)

2,3,7,8-Tetra CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8-Penta CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8-Hexa CDD	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,6,7,8-Hexa CDD	ng/kg		TS	0,40		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8,9-Hexa CDD	ng/kg		TS	0,30		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,6,7,8-Hepta CDD	ng/kg		TS	21		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
Octa CDD	ng/kg		TS	74		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,7,8-Tetra CDF	ng/kg		TS	0,80		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8-Penta CDF	ng/kg		TS	0,50		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,4,7,8-Penta CDF	ng/kg		TS	0,30		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	0,30		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,6,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,7,8,9-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
2,3,4,6,7,8-Hexa CDF	ng/kg		TS	<0,20		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,6,7,8-Hepta CDF	ng/kg		TS	1,1		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
1,2,3,4,7,8,9-Hepta CDF	ng/kg		TS	<0,60		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
Octa CDF	ng/kg		TS	<2,0		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
TCDD-Toxizitätsäquivalente	ng TE/kg	x)	TS	0,65		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)
TE-WHO PCDD/F (2005)	ng TE/kg	xx)	TS	1,0		DIN 38414-S 24 (10.00)(ZF)

Dioxinlike PCB (dl-PCB)

PCB (105)	ng/kg	<98,9 m)	OS	<100		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (114)	ng/kg	<49,5	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (118)	ng/kg	<213 m)	OS	<215		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (123)	ng/kg	<49,5	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (126)	ng/kg	<4,95	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (156)	ng/kg	<49,5	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (157)	ng/kg	<49,5	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (167)	ng/kg	<49,5	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (169)	ng/kg	<4,95	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (189)	ng/kg	<49,5	OS	<50,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (77)	ng/kg	<19,8	OS	<20,0		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (81)	ng/kg	<4,95	OS	<5,00		AbfKlärV 1992(ZF)
TE-WHO dl-PCB (2005)	ng TE/kg	0,67 ^{xx5)}	OS	0,67		Berechnung WHO 2005

Non-dioxinlike PCB (ndl-PCB)

PCB (101)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (138)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (153)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (180)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (28)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)
PCB (52)	ng/kg	<0,001	OS	<0,001		AbfKlärV 1992(ZF)

Polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

Acenaphthen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Acenaphthylen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Anthracen	ng/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(a)-Anthracen	ng/kg	0,012	OS	0,012		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo(a)pyren	ng/kg	0,0076	OS	0,0077		VDLUF A VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)



PRÜFBERICHT 2847245 - 114726

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Benzo-(b)-Fluoranthren	mg/kg	0,022	OS	0,022		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(ghi)-Perylen	mg/kg	0,016	OS	0,016		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Benzo-(k)-Fluoranthren	mg/kg	0,010	OS	0,010		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Chrysen	mg/kg	0,025	OS	0,025		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Dibenzo-(a,h)-Anthracen	mg/kg	0,0044	OS	0,0044		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Fluoranthren	mg/kg	0,027	OS	0,027		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Fluoren	mg/kg	<0,0050	OS	<0,0051		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Indeno-(1,2,3-cd)-Pyren	mg/kg	0,012	OS	0,012		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Naphthalin	mg/kg	0,026	OS	0,026		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Phenanthren	mg/kg	<0,020	OS	<0,020		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
Pyren	mg/kg	0,023	OS	0,023		VDLUF VII, 3.3.3.2 : 2011 (mod.)
PAK (EPA)	mg/kg	0,19 ^{x)}	OS	0,19		Berechnung

Perfluorierte Verbindungen (PFC)

Perfluorooctansäure (PFOA)	µg/kg	<5,0	OS	<5,1		DIN 38414-14 (S 14)(OB)
Perfluorooctansulfonsäure (PFOS)	µg/kg	<5,0	OS	<5,1		DIN 38414-14 (S 14)(OB)
Summe PFT	µg/kg	<10 ^{x)}	OS			ISO 25101 (mod.) / DIN 38414-14 (S 14)

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
-------------	---------	--------------------	----	--	--	---------------------------------------

x) Einzelwerte, die die Nachweis- oder Bestimmungsgrenze unterschreiten, wurden nicht berücksichtigt.

xx) Bei Einzelwerten unter der NWG wurde die Nachweisgrenze und bei Werten zwischen NWG und BG die Bestimmungsgrenze zur Berechnung zugrunde gelegt.

xx5) Bei Einzelwerten unter der BG wurde die Bestimmungsgrenze zur Berechnung zugrunde gelegt.

m) Die Nachweis-, bzw. Bestimmungsgrenze musste erhöht werden, da Matrixeffekte bzw. Substanzüberlagerungen eine Quantifizierung erschweren.

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.

Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz

u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

v) externe Dienstleistung

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg, für die zitierte Methode akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Akkreditierungsverfahren: D-PL-14289-01-00

Methoden

DIN 38414-14 (S 14)

Extern bereitgestellte Dienstleistung durch

(ZF) ZFD, BERNECKERSTR. 17-21, 95448 BAYREUTH, für die zitierte Methode akkreditiert nach DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Akkreditierungsverfahren: D-PL-19418-01-00

Methoden

AbfklärV 1992; DIN 38414-S 24 (10.00)

Datum 17.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2847245 - 114726

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 04.02.2021
Ende der Prüfungen: 17.03.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.




Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

 Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

 Datum 03.03.2021
Kundennr. 10087614
PRÜFBERICHT 2856044 - 130537
 Auftrag 2856044 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
 Analysenr. 130537
 Probeneingang 22.02.2021
 Probenahme 18.02.2021
 Kunden-Probenbezeichnung 15

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	7,6	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	1,7	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	41,8	OS	42,5		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	56,5	OS	57,5		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	3,2	OS	3,3		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	<0,20	OS	<0,20		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	4,9	OS	5,0		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	0,18	OS	0,18		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	6,1	OS	6,2		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,60	OS	0,61		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,94	OS	0,96		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,62	OS	0,63		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	31800	OS	32300		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	333	OS	339		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	3,96	OS	4,03		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	12,8	OS	13,0		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,46	OS	0,47		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	37,1	OS	37,7		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	u) *) mg/kg	<0,10	OS	<0,10		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	19,6	OS	19,9		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,28	OS	0,28		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Datum 03.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2856044 - 130537

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Salmonellen	*) in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 22.02.2021

Ende der Prüfungen: 03.03.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 03.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2856044 - 130538

Auftrag 2856044 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysennr. 130538
Probeneingang 22.02.2021
Probenahme 18.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 16

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	7,3	OS			Berechnung
Wassergehalt	2,7	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	41,7	OS	42,9		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	55,6	OS	57,1		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	3,3	OS	3,4	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	<0,20	OS	<0,21	VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	5,0	OS	5,1	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	0,22	OS	0,23	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	6,1	OS	6,3	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,56	OS	0,58	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,95	OS	0,98	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,48	OS	0,49	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	31700	OS	32600	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	332	OS	341	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	3,75	OS	3,85	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	12,4	OS	12,7	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,43	OS	0,44	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	36,7	OS	37,7	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	mg/kg	<0,09 ^{pe)}	OS	<0,10	DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	19,0	OS	19,5	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,23	OS	0,24	DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,10	VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

Datum 03.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2856044 - 130538

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Salmonellen	*) in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK

pe) Die Nachweis-, bzw. Bestimmungsgrenze musste erhöht werden, da Matrixeffekte eine Veränderung des Verhältnisses von Probenmenge zum Extraktionsmittel erforderten.

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.

Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz

u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 22.02.2021

Ende der Prüfungen: 03.03.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 03.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2856044 - 130539

Auftrag 2856044 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 130539
Probeneingang 22.02.2021
Probenahme 18.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 17

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Physikalisch-chemische Parameter

C/N Verhältnis	*)	8,0	OS			Berechnung
Wassergehalt	%	5,3	OS			DIN EN 12880 : 2001-02
Organische Substanz	%	41,4	OS	43,7		VDLUF II, 10.1 : 1999
Glührückstand 550°C	%	53,3	OS	56,3		VDLUF II, 10.1 : 1999

Wertbestimmende Bestandteile

Stickstoff-Gesamt (N)	%	3,0	OS	3,2		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.3.2 : 2003-10
Ammoniumstickstoff (NH ₄ -N)	%	<0,20	OS	<0,21		VO(EG) 2003/2003, IV, 2.1 : 2003-10
Gesamtposphat (P ₂ O ₅)	%	5,2	OS	5,5		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Kalium-Gesamt (K ₂ O)	%	0,65	OS	0,69		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Calcium (CaO)	%	5,8	OS	6,1		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Magnesium (MgO)	%	0,66	OS	0,70		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Schwefel-Gesamt (S)	%	0,87	OS	0,92		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Natrium (Na)	%	0,92	OS	0,97		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Eisen (Fe)	mg/kg	30300	OS	32000		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
Mangan (Mn)	mg/kg	308	OS	325		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	3,57	OS	3,77		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Blei (Pb)	mg/kg	11,0	OS	11,6		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,40	OS	0,42		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom (Cr)	mg/kg	32,1	OS	33,9		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Chrom VI	mg/kg	<0,10	OS	<0,11		DIN EN 16318 : 2016-07(OB)
Nickel (Ni)	mg/kg	17,2	OS	18,2		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,21	OS	0,22		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS	<0,11		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01

Mikrobiologische Untersuchungen

Datum 03.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2856044 - 130539

	Einheit	Ergebnis	Substanz	Wert i.d.TS	Grenzwert	Methode
Salmonellen	*) in 50 g	nicht nachgewiesen	OS			Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK

Erläuterung: Das Zeichen "<" oder n.b. in der Spalte Ergebnis bedeutet, der betreffende Stoff ist bei nebenstehender Bestimmungsgrenze nicht quantifizierbar.
Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz
u) externe Dienstleistung eines AGROLAB GROUP Labors

Agrolab-Gruppen-Labore

Untersuchung durch

(OB) AGROLAB Standort Bruckberg, Dr.-Pauling-Str. 3, 84079 Bruckberg

Methoden

DIN EN 16318 : 2016-07

Hinweis zur Org. Substanz: Gemäß Methode VDLUFA MB II 10.1 sind Gehalte von Harnstoffverbindungen bei der Berechnung der org. Substanz zu beachten. Sie werden nur berücksichtigt wenn sie auch untersucht, bzw. von Kunden angegeben wurden.

Beginn der Prüfungen: 22.02.2021

Ende der Prüfungen: 03.03.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 03.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2856044 - 130540

Auftrag 2856044 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 130540
Probeneingang 22.02.2021
Probenahme 18.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 18

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	6,0	OS			VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
----------------------	---	-----	----	--	--	---

Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz

Beginn der Prüfungen: 22.02.2021

Ende der Prüfungen: 01.03.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung

Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel, Germany
www.agrolab.de

AGROLAB LUFA Dr.-Hell-Str. 6, 24107 Kiel

Abwasserzweckverband "Mittlere Mulde"
Maxim-Gorki-Platz 1
04838 Eilenburg

Datum 03.03.2021
Kundennr. 10087614

PRÜFBERICHT 2856044 - 130541

Auftrag 2856044 Projekt P-Rückgewinnung; Dr S. Günther, Helmholtz-Zentrum-UFZ; AG 79-119458-VO2
Analysenr. 130541
Probeneingang 22.02.2021
Probenahme 18.02.2021
Kunden-Probenbezeichnung 19

Einheit Ergebnis Substanz Wert i.d.TS Grenzwert Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	6,6	OS			VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09
----------------------	---	-----	----	--	--	---

Die parameterspezifischen analytischen Messunsicherheiten sowie Informationen zum Berechnungsverfahren sind auf Anfrage verfügbar, sofern die berichteten Ergebnisse oberhalb der parameterspezifischen Bestimmungsgrenze liegen.

Erläuterung: Substanz: OS=Originalsubstanz, TS=Trockensubstanz

Beginn der Prüfungen: 22.02.2021

Ende der Prüfungen: 01.03.2021

Die Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die geprüften Gegenstände. In Fällen, wo das Prüflabor nicht für die Probenahme verantwortlich war, gelten die berichteten Ergebnisse für die Proben wie erhalten. Die auszugsweise Vervielfältigung des Berichts ohne unsere schriftliche Genehmigung ist nicht zulässig. Die Ergebnisse in diesem Prüfbericht werden gemäß der mit Ihnen schriftlich gemäß Auftragsbestätigung getroffenen Vereinbarung in vereinfachter Weise i.S. der DIN EN ISO/IEC 17025:2018, Abs. 7.8.1.3 berichtet.



AGROLAB GROUP
Your labs. Your service.

AGROLAB LUFA Herr Gosch, Tel. 0431/1228-110
Kundenbetreuung