

Phosphorrückgewinnung auf Kläranlagen mittels gezielter Nachfällung und Fäll- schlammseparation (P-Rec)

Abschlussbericht

Förderung durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt, AZ 35207/01

Emscher Wassertechnik GmbH, Essen



Emschergenossenschaft, Essen



HGoTECH GmbH, Bonn



Essen, den 31.05.2024

Ansprechpartner:

Emscher Wassertechnik GmbH

Brunnenstr. 37, 45128 Essen

www.ewlw.de

Prof. Dr.-Ing. Holger Scheer, Tel.: 0201 3610-0, E-Mail: scheer@ewlw.de

Dipl.-Ing. Peter Wulf, Tel.: 0201 3610-110, E-Mail: wulf@ewlw.de

Dr.-Ing. Tim Fuhrmann, Tel.: 0201 3610-555, E-Mail: fuhrmann@ewlw.de

M. Sc. Maren Schulte Marxloh, Tel.: 0201 3610-325, E-Mail: schulte-marxloh@ewlw.de

Emschergenossenschaft

Kronprinzenstr. 24, 45128 Essen

www.eglv.de

Dipl.-Ing. Martin Hetschel, Tel.: 0201 104-2301, E-Mail: hetschel.martin@eglv.de

Prof. Dr.-Ing. Karl-Georg Schmelz, Tel.: 0201 104-2374, E-Mail: schmelz.karl-georg@eglv.de

Dr. Jens Schoth, Tel.: 0201 104-2495, E-Mail: schoth.jens@eglv.de

HGoTECH GmbH

Karlrobert-Kreiten-Str. 13, 53115 Bonn

www.hgotech.de

Prof. em. Dr. Heiner Goldbach, Tel.: 0228 38756081-0, E-Mail: goldbach@hgotech.de

Dipl.-Ing. agr. Christian Heck, Tel.: 0228 38756081-0, E-Mail: heck@hgotech.de

Inhaltsverzeichnis

1	Zusammenfassung.....	1
2	Veranlassung und Zielsetzung des Vorhabens	2
3	Verfahrenskonzept.....	3
4	Aufbau der halbtechnischen Versuchsanlage.....	5
4.1	Übersicht Technikumsanlage	5
4.2	Konventioneller Anlagenteil: Mechanische Stufe und Belebungsanlage.....	6
4.3	Aufbau der Nachfällung.....	7
4.4	Filteranlagen	8
4.5	Messtechnik und Probenahme	10
4.6	Dekanter zur Aufkonzentrierung des Fällschlammes.....	11
4.7	Anaerobe Schlammstabilisierung	12
4.8	Bilder der Versuchsanlage	12
5	Untersuchungs- und Messprogramm	15
5.1	Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen	15
5.2	Versuche zur Nachfällung und Fällschlammseparation, Aufstockung mit Phosphorsäure	16
5.3	Versuche mit Einsatz von Sandfilter und Trommelfilter zur Feststoffabscheidung	18
5.4	Versuche zur Aufkonzentrierung des Fällschlammes	18
5.5	Praktische Versuche zur anaeroben Schlammbehandlung	19
5.6	Messprogramm	20
6	Auswertung der Versuchsergebnisse	21
6.1	Bewertung der grundsätzlichen Funktion der Nachfällung.....	21
6.2	Bewertung der Phosphorelimination und zugehörigen Teilergebnisse.....	21
6.2.1	P-Konzentrationsverlauf über die Anlage (Laboranalytik)	21
6.2.2	Fällmitteleinsatz für verschiedene Zielwerte	23
6.2.2.1	Versuche mit Eisen-III-chloridsulfat	23

6.2.2.2	Versuche mit Aluminiumsulfat	26
6.2.2.3	Aufsalzung	29
6.2.3	Fällschlammanfall.....	29
6.2.4	Fällschlammseparation und Leistung der Filteranlagen	30
6.2.4.1	Auswertung der Feststoffkonzentrationen	30
6.2.4.2	Auswertung der Feststoffbeladung	32
6.2.4.3	Variation der hydraulischen Beschickung der Filteranlagen	33
6.3	Versuche mit anaerober Stabilisierung.....	34
6.4	Phosphorbilanz	35
6.4.1	Theoretische P-Bilanz.....	35
6.4.2	P-Bilanz auf Basis der Analysenergebnisse.....	36
6.5	Bewertung der erzielten Ergebnisse im Vergleich zu den Anforderungen der AbfKlärV 38	
6.6	Aufkonzentrierung des Fällschlammes.....	39
7	Untersuchung der Verwertungspotentiale des gewonnenen Stoffstroms.....	40
7.1	Versuche zur Pflanzenverfügbarkeit.....	40
7.1.1	Versuchsdurchführung.....	40
7.1.2	Hauptversuch 1	41
7.1.2.1	Versuche mit Weidelgras	41
7.1.2.2	Versuche mit Mais	44
7.1.3	Hauptversuch 2	45
7.1.3.1	Versuche mit Weidelgras	45
7.1.3.2	Versuche mit Mais	46
7.1.3.3	Versuche mit Raps	48
7.1.4	Zusammenfassung	51
7.2	Bewertung des Produktes nach Düngemittelverordnung und weiteren rechtlichen Vorgaben.....	51
7.3	Verwertungsorientierte Auswahl der Fällmittel.....	53
7.3.1	Ziel und Durchführung der Vorversuche	53
7.3.2	Ergebnisse der Vorversuche.....	54
7.3.3	Fazit der Vorversuche zum Einfluss des Fällmittels	60
7.4	Zusammenfassende Bewertung der Verwertungspotentiale des Fällschlammes .	61

8	Fazit.....	63
	Literaturverzeichnis.....	66
	Anlagen	68

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1:	Schema mit nachgeschalteter Fällschlammseparation zur Phosphorrückgewinnung	3
Abbildung 4-1:	Fließbild Technikumsanlage (Emschergenossenschaft, 2022)	6
Abbildung 4-2:	Regelung nach der Orthophosphat-Konzentration (DWA, 2020)	8
Abbildung 4-3:	Schematische Darstellung DynaSand-Filter (Nordic Water GmbH, 2022)	9
Abbildung 4-4:	Schematische Darstellung Trommelfilter der Fa. Mecana Umwelttechnik GmbH (Mecana Umwelttechnik GmbH, 2022)	10
Abbildung 4-5:	Online-Messungen und Probenahme	11
Abbildung 4-6:	Bilder der Versuchsanlage	14
Abbildung 5-1:	P-Konzentration im Ablauf der Vorklärung und Zulauf zur Nachfällung, Phosphorsäuredosierung zur Aufstockung	17
Abbildung 6-1:	PO ₄ -P-Konzentrationen im Zulauf zur Belebung, vor und nach der Fällung sowie im Ablauf der Filteranlagen	22
Abbildung 6-2:	P _{ges} -Konzentrationen im Zulauf zur Belebung, vor und nach der Fällung sowie im Ablauf der Filteranlagen	23
Abbildung 6-3:	Versuche mit Zielwert 0,7 mg/l (Fällmittel Eisen(III)-chloridsulfat)	24
Abbildung 6-4:	Versuche mit Zielwert 0,3 mg/l (Fällmittel Eisen(III)-chloridsulfat)	25
Abbildung 6-5:	Versuche mit Zielwert 0,1 mg/l (Fällmittel Eisen(III)-chloridsulfat)	25
Abbildung 6-6:	Versuche mit Zielwert 0,7 mg/l (Fällmittel Aluminiumsulfat)	26
Abbildung 6-7:	Versuche mit Zielwert 0,3 mg/l (Fällmittel Aluminiumsulfat)	27
Abbildung 6-8:	Versuche mit Zielwert 0,1 mg/l (Fällmittel Aluminiumsulfat)	27
Abbildung 6-9:	β-Werte in Abhängigkeit der P-Konzentration nach der Fällmittelzugabe (DWA, 2019)	28
Abbildung 6-10:	Vergleich des gemessenen spezifischen Fällschlammanfalls im Vergleich zu den Ansätzen nach DWA-A 131 (2016)	30
Abbildung 6-11:	Abfiltrierbare Stoffe im Zulauf der Fällung, im Ablauf der Fällung und im Ablauf der Filteranlagen	31
Abbildung 6-12:	Feststoffbeladung des Sandfilters	32
Abbildung 6-13:	Feststoffbeladung des Trommelfilters	33
Abbildung 6-14:	Hydraulische Beschickung der Filteranlagen im Versuchszeitraum	34
Abbildung 6-15:	Trockenrückstand und Glühverlust im Rohschlamm und Faulschlamm	35
Abbildung 6-16:	Feststoff- und P-Bilanz mit Standardwerten nach DWA-A 131 (2016) für aerob stabilisierende Anlage (ohne Bio-P) mit P-Rec	36
Abbildung 6-17:	Feststoff- und P-Bilanz mit Standardwerten nach DWA-A 131 (2016) für eine Belebungsanlage mit Faulung (ohne Bio-P) mit P-Rec	36

Abbildung 6-18: Versuchsergebnisse zum feststoffbezogenen P-Gehalt	37
Abbildung 6-19: Versuchsergebnisse zum feststoffbezogenen P-Gehalt inkl. Erweiterung um eine Faulung	38
Abbildung 6-20: Feststoffgehalt im Zulauf und Austrag des Dekanterns bei den Versuchen zur Aufkonzentrierung	39
Abbildung 7-1: Trockenmassen des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgras nach Düngung mit verschiedenen P-Düngern	42
Abbildung 7-2: P-Entzüge des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgras nach Düngung mit verschiedenen P-Düngern	42
Abbildung 7-3: Aufwuchs an Weidelgras vor dem vierten und letzten Schnitt nach Düngung mit verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Goldstandard TSP	43
Abbildung 7-4: Summe aus initialen CAL-P Gehalten im Substrat und die von Weidelgras aus 4 Schnitten aufsummierte aufgenommene P-Menge nach Düngung mit verschiedenen P-Düngern (Mittelwerte und Standardabweichungen, n = 4)	44
Abbildung 7-5: Trockenmassen des geernteten Aufwuchses von Mais nach Düngung mit verschiedenen P-Rezyklaten	44
Abbildung 7-6: P-Entzüge des geernteten Aufwuchses von Mais nach Düngung mit verschiedenen P-Rezyklaten	45
Abbildung 7-7: Trockenmassen des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgras nach Düngung mit 2 verschiedenen P-Rezyklaten (Therm = Versuchsprodukt thermisch mit Teilaufschluss)	46
Abbildung 7-8: P-Entzüge des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgras nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten	46
Abbildung 7-9: Trockenmassen des geernteten Aufwuchses von Mais nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten	47
Abbildung 7-10: P-Entzüge des geernteten Aufwuchses von Mais nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten	47
Abbildung 7-11: Wachstum von Mais nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Standard TSP	48
Abbildung 7-12: Biomassebildung von Raps nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Standard TSP	48
Abbildung 7-13: P-Entzüge von Raps nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Standard TSP	49
Abbildung 7-14: Wachstum von Raps nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Standard TSP mit deutlichen Unterschieden in der Blütenbildung	50
Abbildung 7-15: Summe aus initialen CAL-P Gehalten im Substrat und die von Raps aufgenommene P-Menge nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten (Mittelwerte und Standardabweichungen, n = 4)	50

Abbildung 7-16: Aufwuchs von Weidelgras vor dem ersten Schnitt	55
Abbildung 7-17: Biomasseertrag von Weidelgras [g TS/Gefäß] in 4 konsekutiven Schnitten (zu beachten: niedrige Temperatur beim ersten Aufwuchs)	55
Abbildung 7-18: Biomasseerträge [g TS/Gefäß] von Luzerne in 4 konsekutiven Schnitten	56
Abbildung 7-19: Biomasseerträge [g TS/Gefäß] von Raps	57
Abbildung 7-20: Biomasseerträge [g TS/Gefäß] von Mais	57
Abbildung 7-21: P-Entzüge von Weidelgras [mg /Gefäß] in 4 konsekutiven Schnitten, hier Bezugsgröße oberirdische Pflanzenteile (s. a. Abbildung 7-17)	58
Abbildung 7-22: P-Entzüge von Luzerne [mg /Gefäß] in 4 konsekutiven Schnitten (s. a. Abbildung 7-18); hier Bezugsgröße oberirdische Pflanzenteile	58
Abbildung 7-23: P-Entzüge [mg P/Gefäß] von Luzerne	59
Abbildung 7-24: P-Entzüge [mg P/Gefäß] von Mais	60

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Eigenschaften der Filtertücher (persönliche Mitteilung Dr. Fundneider, 2022)	10
Tabelle 4-1:	Dosiermengen der Phosphorsäure im Versuchszeitraum	17
Tabelle 4-2:	Geplantes Versuchsprogramm zur Erprobung der hydraulischen Beschickung der Filteranlagen und Filtergeschwindigkeiten	18
Tabelle 4-3:	Durchgeführte Entwässerungsversuche	18
Tabelle 4-4:	Beschickung des Faulbehälters	19
Tabelle 4-5:	Messprogramm	20
Tabelle 6-1:	Versuchslog Hauptversuch 1	41
Tabelle 6-2:	P-Gehalte, gesamt, citrat- und neutralammoncitrat-lösliche Anteile und N _{ges} -Gehalt	51

Abkürzungsverzeichnis

Symbol	Beschreibung	Einheit
AbfKlärV	Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung)	[-]
AlPO ₄	Aluminiumorthophosphat	[-]
AbwV	Abwasserverordnung	[-]
AFS	Abfiltrierbare Feststoffe	[-]
AKE	Abwasserkanal Emscher	[-]
Al	Aluminium	[-]
Bio-P	Biologische Phosphorelimination	[-]
c	Konzentration	[mg/l]
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.	[-]
DüMV	Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung)	[-]
E	Einwohner	[-]
Fa.	Firma	[-]
Fe	Eisen	[-]
FHM	Flockungshilfsmittel	[-]
FM	Fäll- und Flockungsmittel	[-]
GR	Glührückstand	[%]
GV	Glühverlust	[%]
H ₃ PO ₄	Phosphorsäure	[-]
KLEM	Klärwerk Emschermündung	[-]
m	Masse	[g]
M	Molare Masse	[g/mol]
MP	Mischprobe	[-]
n	Stoffmenge	[mol]
NF	Nanofiltration	[-]
N _{ges}	Gesamt-Stickstoff	[-]
NK	Nachklärung	[-]

NO ₂ -N	Nitrit-Stickstoff	[-]
NO ₃ -N	Nitrat-Stickstoff	[-]
OGewV	Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung)	[-]
oTR	Organischer Trockenrückstand	[%]
OZ	Ozonung	[-]
PAC	Pulveraktivkohledosierung	[-]
PAK	Pulveraktivkohle	[-]
PES	Polyester	[-]
pFM	Polymeres Flockungsmittel	[-]
P _{ges}	Gesamt-Phosphor	[mg/l]
PO ₄ -P	Orthophosphat-Phosphor	[mg/l]
PP	Polypropylen	[-]
PS	Primärschlamm	
Q	Zufluss, Volumenstrom, Durchfluss	[m ³ /d, m ³ /h]
SF	Sandfilter	[-]
SK	Säurekapazität	[mmol/l]
SP	Stichprobe	[-]
TF	Trommelfilter	[-]
TM	Trockenmasse	[
TR	Trockenrückstand	[%]
TSP	Triplesuperphosphat	[-]
UO	Umkehrosiose	[-]
WS _{Me}	Metall-Wirksamkeit des Fällmittels	kg _{TS} /kg _{Me}

Hinsichtlich der in der Abwasserreinigung verwendeten Abkürzungen und Indices wird auf das Kapitel 2 des Arbeitsblatts DWA-A 131 (DWA, 2016) verwiesen.

1 Zusammenfassung

Im vorliegenden Projekt wurde ein Verfahren zur Phosphorrückgewinnung als Bestandteil der Abwasserreinigung bzw. Schlammbehandlung untersucht. Dabei wurde ein Verfahrenskonzept zur Gewinnung eines mit Phosphor angereicherten Fällschlammes als separater Stoffstrom einer Nachfällung ausgearbeitet. Neben der theoretischen Betrachtung erfolgte eine Erprobung des Verfahrens auf der Technikumsanlage des Großklärwerks Emschermündung (KLEM).

Um das originäre Ziel der Abwasserreinigung sicher zu stellen, galt es im ersten Schritt die grundsätzliche Funktion der Nachfällung zu bewerten. Es zeigte sich, dass eine gute P-Elimination mit alleiniger Nachfällung möglich ist. Mit Einsatz zweier verschiedener Fällmittel (Eisen-III-chloridsulfat und Aluminiumsulfat) wurden auch weitergehende Anforderungen sicher eingehalten, bspw. bis zum untersuchten Zielwert von 0,1 mg/l Orthophosphat.

Zur Feststoffabscheidung des Fällschlammes wurden parallel ein Raumfilter (Dynasand-Filter) und ein Flächenfilter (Trommelfilter) eingesetzt. Es zeigte sich ein gut abscheidbarer Fällschlamm und ein grundsätzlich guter Rückhalt des Fällschlammes mit den Filteranlagen und damit auch eine gute Elimination von P_{ges} .

Von besonderem Interesse ist bei dem entwickelten Verfahren die Abreicherung im zu entsorgenden Schlamm im Vergleich zur geforderten Reduzierung der Phosphorgehalte auf < 20 g P/kg Trockenmasse (TM) gemäß der AbfKlärV (2017). Die rechnerische Bilanzierung der Feststoffe und des Phosphors für zwei mögliche Anlagenkonstellationen des entwickelten Verfahrenskonzeptes ergab eine deutliche Unterschreitung der Forderung. Bei den praktischen Versuchen konnte dies bei störungsfreiem Anlagenbetrieb und erweitertem Versuchsumfang im Faulschlamm erreicht werden.

Zur Beurteilung der Verwertungspotentiale des gewonnenen Stoffstroms wurden u. a. die Möglichkeit zur Aufkonzentrierung, die düngemittelrechtlichen Anforderungen und die Pflanzenverfügbarkeit untersucht. Den Stoffstrom zur Phosphorrückgewinnung bildet bei dem entwickelten Verfahrenskonzept der Fällschlamm der Nachfällung bzw. das Spülwasser der Filteranlagen. Mit einem Dekanter konnte einstufig eine gute Aufkonzentrierung des Stoffstroms erreicht werden, bis zu 32 %. Zur Untersuchung der Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Phosphats wurden standardisierte Pflanzenversuche mit verschiedenen Pflanzenarten durchgeführt. Der Fällschlamm, insbesondere mit Einsatz von Aluminiumsulfat als Fällmittel, zeigte dabei eine sehr gute Pflanzenverfügbarkeit.

Das entwickelte Verfahren im P-Rec-Projekt zeigt ein großes Potential als alternatives Verfahren zur Umsetzung der P-Rückgewinnung. Gegenüber den Verfahren mit Rückgewinnung aus der Asche stellt das untersuchte Verfahren eine wirtschaftlich und technisch einfache Lösung dar. Es empfiehlt sich zur Weiterentwicklung und Etablierung des P-Rec-Verfahrens mit weiteren Untersuchungen Wissenslücken zu schließen und die Ergebnisse zu verifizieren. Ein wesentlicher im Detail weiter zu untersuchender und zu verifizierender Punkt ist die Abreicherung des spezifischen Phosphorgehaltes unter 20 g P/kg TM im zu entsorgenden Schlamm.

2 Veranlassung und Zielsetzung des Vorhabens

Zur Schonung der natürlichen Phosphorressourcen wurden mit der 2017 novellierten Klärschlammverordnung (AbfKlärV, 2017) erstmals konkrete Anforderungen an die Rückgewinnung von Phosphor aus dem Abwasser eingeführt. Bis Ende 2023 haben Betreiber von Kläranlagen ein Konzept mit den von ihnen geplanten Maßnahmen zur Phosphor-Rückgewinnung vorzulegen. Ab 2029 bzw. 2032 greift die konkrete Verpflichtung zur Phosphor-Rückgewinnung ab einem definierten Phosphorgehalt (20 g P/kg TM) und Ausbaugröße (100.000 bzw. 50.000 EW). Daher besteht akuter Forschungs- und Entwicklungsbedarf für die praxisreife Weiterentwicklung von wirtschaftlichen und betriebssicheren Lösungen zur Phosphorrückgewinnung.

Die derzeit in der Entwicklung befindlichen Verfahren für kommunale Kläranlagen konzentrieren sich vor allem auf die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche. Trotz Weiterentwicklung der zugehörigen Verfahren und Anlagentechnik stellen diese Rückgewinnungsmethoden eine technisch und wirtschaftlich aufwändige Lösung dar.

Mit dem vorliegenden Projekt soll dagegen ein Weg zur P-Rückgewinnung direkt als Bestandteil der Abwasserreinigung bzw. Schlammbehandlung aufgezeigt werden. Dazu wird ein Verfahrenskonzept erprobt, bei dem die Rückgewinnung über einen P-angereicherten Fällschlamm nach gezielter Verlagerung von P-Stoffströmen aus der biologischen Stufe in eine Nachfällung erfolgt. Für die notwendige Feststoffabtrennung werden ein Flächen- und ein Raumfilter getestet. Für die Fällung ist ein angepasstes Automatisierungskonzept zu untersuchen.

Der anfallende Fällschlamm (Tertiärschlamm) soll direkt für landwirtschaftliche Zwecke genutzt werden können und so den Einsatz von P-haltigem Minereraldünger verringern. Es werden umfassende Bewertungen des Fällprodukts vorgenommen und geeignete Verwertungsperspektiven untersucht. Die Corona-Pandemie und der Ukraine-Krieg haben aktuell die Abhängigkeiten der Düngelindustrie von den Lieferketten und dem Weltmarkt aufgezeigt. Der Minereraldünger hat zeitweise einen extremen Preisanstieg erfahren.

Erprobt wird, entsprechend der Klärschlammverordnung, die Phosphorgehalte im Überschussschlamm bzw. im zu entsorgenden Schlamm auf < 20 g P/kg TM (2 %) zu senken und somit eine aufwändige Phosphorrückgewinnung aus den Aschen der Monoverbrennung des Überschussschlammes zu vermeiden. Insbesondere bei höheren P-Gehalten im Schlamm können für die Erzielung des 2-%-Ziels in Ergänzung zur vorgenannten Verlagerung der P-Frachten und separaten Fällschlammseparation, vor allem bei Anlagen mit vermehrter biologischer P-Elimination, zusätzlich auch weitere bewährte Verfahren zur Phosphorrückgewinnung im Schlamm oder Schlammwasser zum Einsatz kommen.

3 Verfahrenskonzept

Ziel des Verfahrenskonzeptes ist die Gewinnung eines mit Phosphor angereicherten Fällschlammes als separater Stoffstrom. Dies wird in Form einer Nachfällung mit separater Feststoffabscheidung umgesetzt.

Abbildung 3-1 zeigt ein Schema der entwickelten Verfahrensführung mit der Nachfällung und separaten Fällschlammabscheidung.

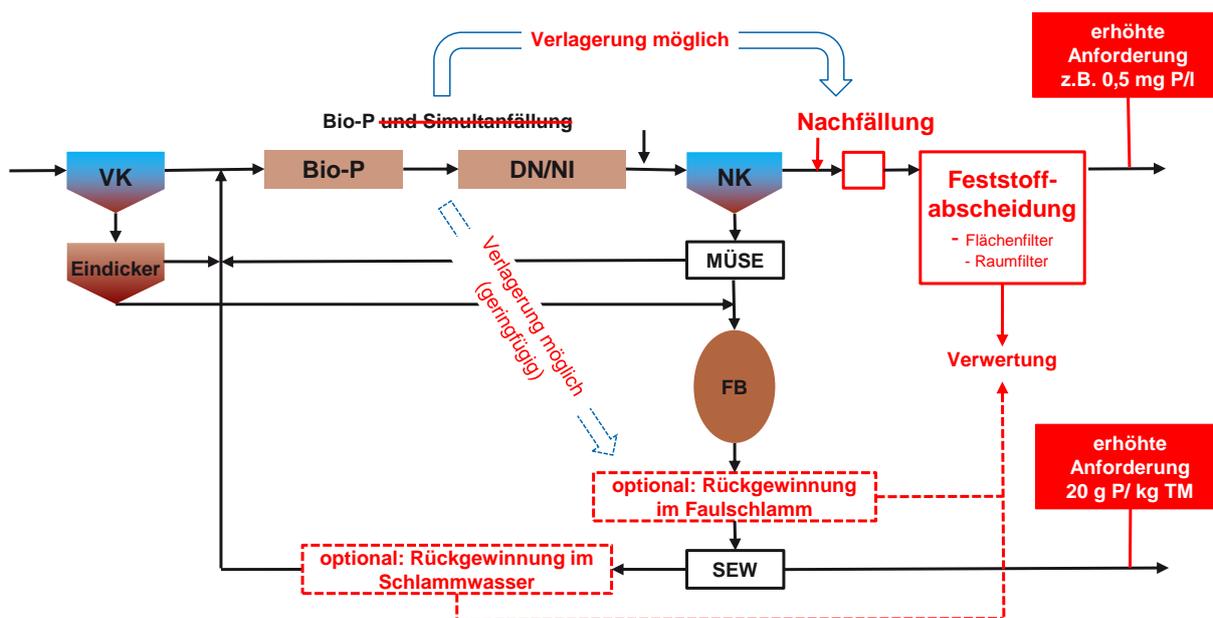


Abbildung 3-1: Schema mit nachgeschalteter Fällschlammseparation zur Phosphorrückgewinnung

Um das Potential der Rückgewinnung mit dem separaten Stoffstrom auszuschöpfen, ist ein möglichst hoher Anteil der im Abwasser enthaltenen Phosphorfracht erst in der nachgeschalteten Stufe zu entfernen. Die Phosphorelimination in der Belebungsstufe ist entsprechend anzupassen. Dazu wird die Phosphorelimination ohne Simultanfällung mit ausschließlicher Nachfällung erprobt.

Der biologische gebundene Phosphor und die vermehrte biologische Phosphorelimination werden in Abhängigkeit der Milieubedingungen bewertet. Die vermehrte biologische Phosphorelimination wird grundsätzlich durch den Wechsel vom anaeroben zum aeroben Milieu sowie durch die Verfügbarkeit von leicht abbaubarem Substrat im anaeroben Milieu und der resultierenden Anreicherung bestimmter Mikroorganismen erreicht. Bei Anwesenheit von Sauerstoff oder signifikanten Nitratkonzentrationen ist keine Voraussetzung für die vermehrte biologische Phosphorelimination gegeben.

Als Automatisierungslösung für die Nachfällung wurde insbesondere eine Regelung nach der Phosphatkonzentration im Ablauf der Nachfällung erprobt.

Ein wesentlicher Untersuchungsschwerpunkt ist die nachgeschaltete Feststoffabscheidung mit unterschiedlichen Verfahren, hier einer Sand- und Trommelfiltration, sowie die Charakteristik des gewonnenen Fällschlammes (Tertiärschlamm). Entsprechend ist die Auswahl geeigneter Fällmittel auch im Hinblick auf die Schlammverwertung zu untersuchen. Bei der Charakteristik des Fällschlammes ist neben der inhaltlichen Analyse die weitere Aufkonzentrierung für die großtechnische Verwertbarkeit von wesentlichem Interesse, wozu entsprechende Anlagentechnik erprobt wurde.

Über das Ziel der Phosphorrückgewinnung hinaus besteht mit der zusätzlichen Feststoffabscheidung über Filteranlagen eine gute Voraussetzung zur Erzielung sehr geringer Gesamtposphor-Ablaufwerte im gereinigten Abwasser.

Zur Bewertung der Elimination definierter Phosphor-Belastungen wurde die Möglichkeit zur Dosierung von Phosphorsäure vorgesehen. Als Dosierstelle wurde der Ablauf der Vorklärung bzw. Zulauf zur Belebung gewählt.

Die anaerobe Schlammstabilisierung ist zur Vervollständigung der Bilanz über Faulversuche erprobt worden.

Die detaillierte Beschreibung der Umsetzung des Verfahrenskonzeptes erfolgt mit der Beschreibung der Versuchsanlage (Kapitel 4). Das Untersuchungs- und Messprogramm wird in Kapitel 5 beschrieben.

4 Aufbau der halbtechnischen Versuchsanlage

4.1 Übersicht Technikumsanlage

In Dinslaken betreibt die Emschergenossenschaft das Großklärwerk Emschermündung (KLEM). Das Klärwerk verfügt über eine separate Technikumsanlage zur Untersuchung aktueller und innovativer Aufgabenstellungen. Die Ausbaugröße der Technikumsanlage beträgt 1.000 EW, sie befindet sich am östlichen Rand des Kläranlagengrundstückes.

In Anlehnung an eine konventionelle Abwasserbehandlungsanlage verfügt die Versuchskläranlage über eine mechanische und biologische Behandlungsstufe. Die mechanische Stufe kann mit einer konstanten Abwassermenge von bis zu 10 l/s beaufschlagt und die hydraulische Belastung der biologischen Reinigungsstufe über eine vorzugebende Ganglinie mit den Eckwerten $Q_T = 4,4$ l/s und $Q_M = 8,8$ l/s betrieben werden. Die Belebungsstufe ist zweistraßig mit jeweils vorgeschalteter Denitrifikation ausgeführt.

Mit weiteren, hier nicht genutzten Anlagenkomponenten, besteht auch die Möglichkeit, Versuche zur 4. Reinigungsstufe und weitergehenden Abwasserreinigung durchzuführen. Eine vorhandene Sandfiltration kann alternativ mit granulierter Aktivkohle befüllt werden. Als weitere nachgeschaltete Verfahren können je nach Versuchsaufbau eine Pulveraktivkohledosierung (PAC), die Ozonung (OZ) sowie das Verfahren der Nanofiltration (NF) bzw. Umkehrosmose (UO) eingesetzt werden.

Abbildung 4-1 zeigt ein allgemeines Fließbild der Technikumsanlage. Der Aufbau und die Anpassungen für das Projekt werden nachfolgend beschrieben.

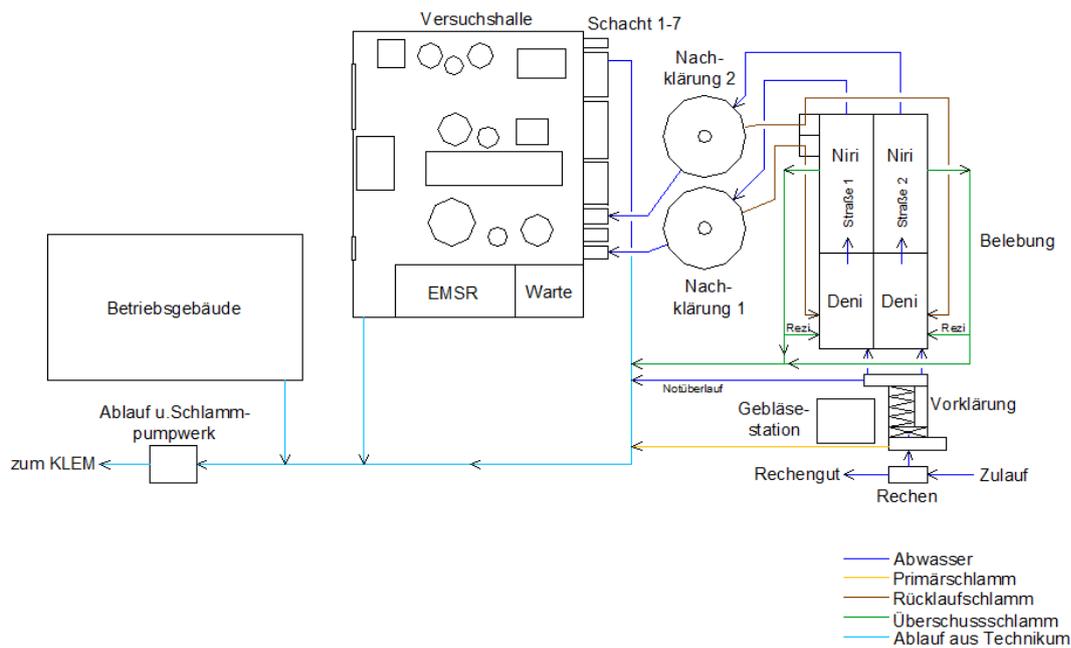


Abbildung 4-1: Fließbild Technikumsanlage (Emschergeossenschaft, 2022)

4.2 Konventioneller Anlagenteil: Mechanische Stufe und Belebungsanlage

Zu- und Ablauf der Technikumsanlage

Über den Untersuchungszeitraum wurde im Zuge des Umbaus des Emschersystems die Zulaufsituation der Technikumsanlage verändert. Mit Beginn der Untersuchungen wurde das Technikum aus dem Einzugsgebiet Nassenkampgraben und der Nebeneinzugsgebiete des Waldteichgrabens beschickt. Zur Beschickung dienen zwei stationäre Tauchmotorpumpen mit einer Förderleistung von jeweils $36 \text{ m}^3/\text{h}$. Mit entsprechendem Fortgang der Arbeiten am Abwasserkanal Emscher (AKE) erfolgt seit Ende 2021 der Umschluss des Zulaufs mit einer Beschickung aus dem AKE. Der Ablauf der Versuchskläranlage wird wieder zurück in den AKE gepumpt.

Die Zu- und Ablaufpumpen sind steuertechnisch miteinander gekoppelt und beziehen die Stromversorgung über mobile Schaltschränke. Die Steuerung der Pumpen erfolgt über die Schaltwarte der Technikumskläranlage.

Mechanische Reinigung

Die mechanische Reinigung des Zulaufes erfolgt über eine Siebschnecke mit integrierter Siebgutpresse. Das Rechengut wird in einer 5 m^3 Mulde aufgefangen und bis zur Abfuhr gelagert.

Die Versuchskläranlage verfügt über keinen Sandfang. Dadurch findet die Sandsedimentation in der Vorklämung statt. Sie ist in Rechteckbauweise mit einer Oberfläche von ca. 6 m^2 und

einem Volumen von 14 m³ erstellt. Die Zulaufmenge ist variabel und die Auslegung ist für einen maximalen Zufluss von 10 l/s bei einer Aufenthaltszeit von 0,4 h (23 min) berechnet.

Belebung

Für den weitergehenden Nährstoffabbau wurde das Verfahren der vorgeschalteten Denitrifikation gemäß der Konzeption der biologischen Stufe des KLEM gewählt. Die fünf Beckensequenzen gleicher Bauart und -größe werden zu 1/5 bzw. 2/5 als Denitrifikationszone und 4/5 bzw. 3/5 als Nitrifikationszone genutzt. Zur Erhöhung der Verfahrensmodulation sind 4 von 5 Becken mit Belüftungsaggregaten ausgestattet. Zur Durchmischung des Belebtschlammes befindet sich in den Denitrifikationsbecken jeweils ein Rührwerk.

Im Fall einer veränderten Abwasserzusammensetzung kann beispielsweise der Denitrifikationsanteil vergrößert werden. Alternativ zur anoxischen Fahrweise besteht weiterhin die Möglichkeit, das vordere Becken anaerob in Funktion einer Bio-P-Stufe zu betreiben. Jede Beckeneinheit hat bei einer Abmessung $H * B * L = 3 * 3 * 3$ m ein Nutzvolumen von 27 m³. Pro Straße steht insgesamt ein Belebungsvolumen von 135 m³ zur Verfügung.

Nachklärung

Als Sedimentationsbecken wird für jede Straße ein Dortmundbrunnen mit einem Durchmesser von 5,60 m und einer Tiefe von 4,70 m vorgesehen. Der Rücklaufschlamm wird direkt aus der Trichterspitze abgezogen. Die Rücklaufschlammmenge beträgt $0,5 \cdot Q_M$ bzw. $1,0 \cdot Q_T$.

Schlammbehandlung

Der anfallende Primär- und Überschussschlamm wird über die Ablaufleitung der Versuchskläranlage zum KLEM abgeleitet. Bei Bedarf können die Schlämme aus entsprechenden Vorlagebehältern abgezweigt und z. B. für Faul- oder Entwässerungsversuche in der Versuchshalle eingesetzt werden.

4.3 Aufbau der Nachfällung

Für die Untersuchungen des Projektes erfolgt die Fällmitteldosierung und -einmischung in einem separaten Reaktor, der dem Ablauf der Nachklärung nachgeschaltet wurde. Gemäß DWA-A 202 (DWA, 2011) wird eine Aufenthaltszeit des Abwassers in der Mischzone von ca. einer Minute empfohlen. Die Größe des installierten Reaktors von 0,54 m³ ermöglicht bei einem Zulauf von 1 bis 4 l/s eine Einmischzeit von 1 bis 4,5 min. Nachgeschaltet ist ein Flockungsreaktor mit 12,6 m³ Volumen (Schacht 4). Es ergibt sich eine Aufenthaltszeit zur weiteren Flockenbildung von 26 bis 105 min. Im DWA-A 202 (DWA, 2011) wird eine Reaktionszeit zur Makroflockenbildung von etwa 20 bis 30 Minuten empfohlen.

In beiden Reaktoren sind Rührwerke installiert. Im Fällungsreaktor soll mit dem installierten Rührwerk mit einem vergleichsweise hohen Energieeintrag eine intensive Einmischung erzielt werden. Im Flockungsreaktor ist der Energieeintrag mit dem installierten Rührwerk gering, um die gebildeten Flocken nicht zu zerstören.

Die Dosierung des Fällmittels wird in Abhängigkeit der online gemessenen Phosphatkonzentration im Ablauf (Erreichen des Zielwertes) geregelt.

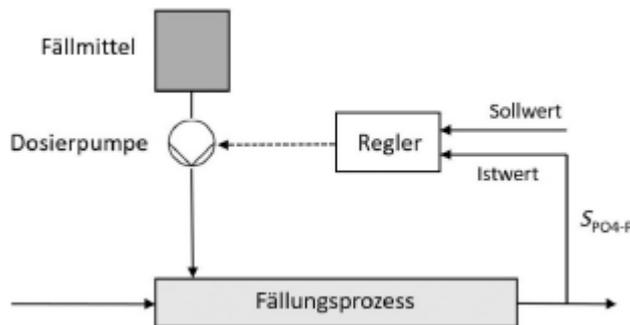


Abbildung 4-2: Regelung nach der Orthophosphat-Konzentration (DWA, 2020)

4.4 Filteranlagen

Für die Versuchsdurchführung und die Abscheidung des Fällschlammes wurden zwei verschiedene Filteranlagen betrieben.

Schnellsandfilter DynaSand® DST 15 AE

Bei dem DynaSand® DST 15 AE der Fa. Nordic Water GmbH handelt es sich um einen Einschicht-Schnellsandfilter, der als Behälterbauweise ausgeführt ist. Die Schnellsandfiltration ist ein Tiefenfiltrationsverfahren, bei dem das Filterbett aufwärts durchströmt wird. Das Filterbett besteht aus Quarzsand mit einer Korngröße von 1-2 mm und ist 1,5 m hoch. Die Filterfläche des betriebenen Moduls beträgt 1,5 m².

Das Wasser strömt durch das Zulaufrohr über das Zentralrohr und den Zulaufverteiler in den Filter. Es steigt durch das sich nach unten bewegende Filterbett nach oben. Das filtrierte Wasser verlässt den Filter über eine Überfallkante durch das Ablaufrohr im oberen Filterteil.

Der verschmutzte Sand wird durch eine im Zentralrohr installierte Mammutpumpe vom Filterboden zum oberen Bereich des Sandwäschers transportiert. Dort fällt der Sand anschließend durch den Sandwäscher, indem er im Gegenstrom mit sauberem Filtrat gereinigt wird.

Der gereinigte Sand fällt auf die Oberfläche des Filterbetts zurück und nimmt dann erneut am Filtrierprozess teil. Das Waschwasser verlässt den Filter zusammen mit den abgeschiedenen

Feststoffen durch den Waschwasserablauf. Der Spülschlamm wird in einem IBC als Vorlage für die spätere Aufkonzentrierung zwischengespeichert.

Vom Spülschlamm und das Filtrat des Schnellsandfilters (Ablauf) werden mit automatischen Probenehmer (PN 6, PN 8) 24-h-Mischproben entnommen und analysiert (vgl. Abbildung 4-5).

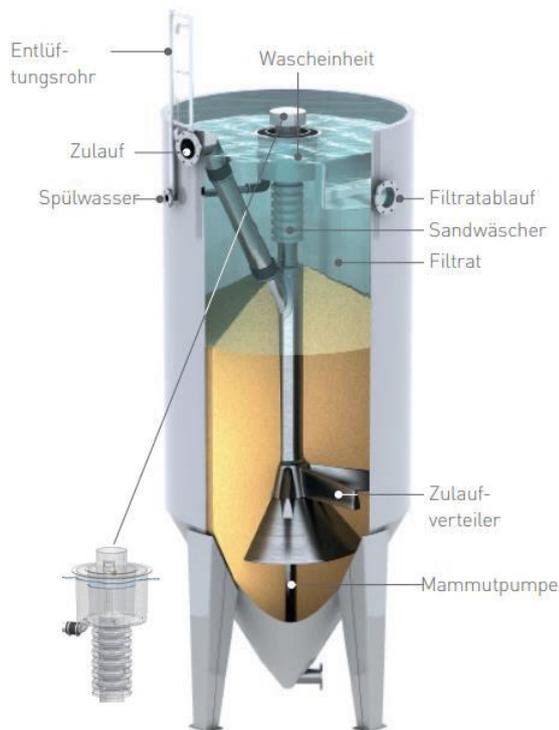


Abbildung 4-3: Schematische Darstellung DynaSand-Filter (Nordic Water GmbH, 2022)

Trommelfilter Mecana TF 2

Der Trommelfilter Mecana TF 2 der Fa. Mecana Umwelttechnik GmbH ist für einen maximalen Durchsatz von 25 m³/h und maximal 200 mg_{AFS}/l ausgelegt und funktioniert gemäß dem Verfahren der Oberflächenfiltration. Dabei werden Filtertücher aus Polstoffen über eine horizontal gelagerte, gelochte Trommel gespannt. Die Filterfläche beträgt bei der eingesetzten Baugröße 2 m². Die Trommel ist vollständig in den Ablauf der Nachfällung eingetaucht. Die Filtration erfolgt von außen in das Innere der Trommel, wodurch das Filtrat im Anschluss über eine Ablaufvorrichtung das Aggregat verlässt. Die an der Polstoffoberfläche zurückgehaltenen Feststoffe (Spülschlamm) werden durch einen Saugbalken entfernt und als Vorlage für die spätere Aufkonzentrierung zwischengespeichert.

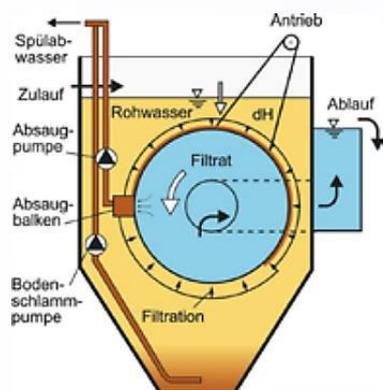


Abbildung 4-4: Schematische Darstellung Trommelfilter der Fa. Mecana Umwelttechnik GmbH (Mecana Umwelttechnik GmbH, 2022)

Vom Spülschlamm und dem Filtrat des Trommelfilters (Ablauf) werden ebenfalls mit automatische Probennehmer (PN 7, PN 9) 24-h-Mischproben entnommen und analysiert (vgl. Abbildung 4-5).

Die Feststoffabscheidung des Trommelfilters ist während des Projekts mit den Polstoff Filtertüchern (1) OptiFiber® PES-14 und (2) Polstoff Filtertuch OptiFiber® PES-15 getestet worden. Die Eigenschaften der verwendeten Filtertücher sind Tabelle 4-1 zu entnehmen.

Tabelle 4-1: Eigenschaften der Filtertücher (Fundneider, 2022)

Parameter	OptiFiber® PES-14	OptiFiber® PES-15
Versuchszeitraum	03/2021 – 12/2021	12/2021 – 03/2022
Polfaserschicht		
Material	Endlosfilament aus Polyester (PES)	Endlosfilament aus PES
Farbe	Blau	Weiß
Höhe aufgerichteter Polfasern	14 mm	14 mm
Durchmesser Einzelfilament	7,4 µm	4,9 µm
Spezifische Polfaseroberfläche	210 m ² /m ²	260 m ² /m ²
Rückengewebe		
Material	Endlosfilament aus PES und Polypropylen (PP)	Endlosfilament aus PES und PP
Strömungsrelevante Poren	> 400 x 400 µm	> 400 x 400 µm
Offene Oberfläche	> 16 %	> 16 %

4.5 Messtechnik und Probenahme

Für den regulären Versuchsbetrieb wurde ein Untersuchungs- und Messprogramm erarbeitet. Die Probenahmestellen der Online-Messungen und der zusätzlichen Probenahmen, einschließlich der erfassten Parameter, sind Abbildung 4-5 zu entnehmen.

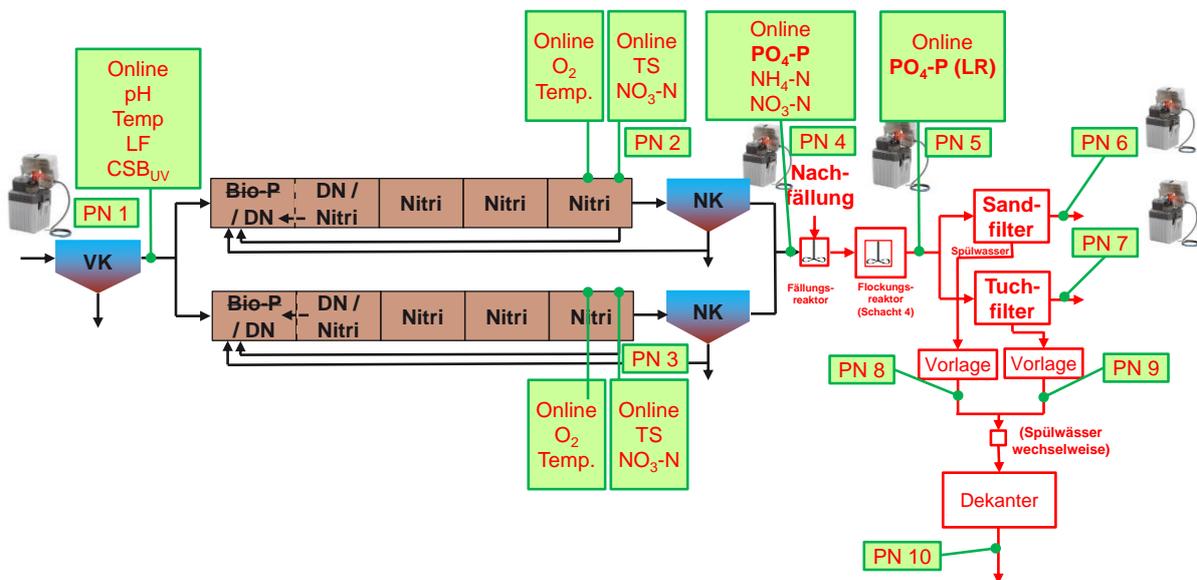


Abbildung 4-5: Online-Messungen und Probenahme

4.6 Dekanter zur Aufkonzentrierung des Fällschlammes

Zur Aufkonzentrierung des Fällschlammes wurde eine Marktrecherche zur Auswahl eines Aggregates durchgeführt. Eine Herausforderung stellt der sehr geringe Feststoffgehalt im aufkonzentrierenden Spülwasser dar.

Neben der möglichst weitgehenden Aufkonzentrierung ist es Ziel die Übertragbarkeit auf die Großtechnik mit abzubilden. Laboraggregate scheinen damit wenig geeignet. Die Größe verfügbarer Aggregate für den untersuchten Maßstab ist eingeschränkt. Recherchiert wurde unter anderem zu Dekantern unterschiedlicher Anbieter, Schneckenpressen und einer Kombination von Lamellenklären mit Bandfiltern als erste Stufe. Zu erproben wäre über die genutzte Anlagenkonstellation hinaus im Zuge weiterer Untersuchungen eine mehrstufige Aufkonzentrierung.

Als geeignetes und verfügbares Aggregat zur Erprobung stellte sich für die vorliegenden Untersuchungen eine Dekantierzentrifuge des Typs Aldec 10 der Fa. Alfa Laval Mid Europe GmbH heraus, die in der Versuchshalle des Technikums installiert wurde. Mit der Zentrifugalkraft kann der Spülschlamm der Filteranlagen in eine Schlamm- und eine Wasserfraktion getrennt werden.

Die Durchsatzleistung des verwendeten Dekanters liegt zwischen 0,2 bis 1,0 m³/h oder ca. 50 kg_{TS}/h. Die maximale Trommeldrehzahl ist mit 5.300 U/min angegeben.

Für die Entwässerungsversuche sind die Spülschlämme beider Filteranlagen verwendet worden. Die Beschickung des Dekanters erfolgt aus einem Schlammvorlagebehälter (IBC) mit zwei Kammern, je ca. 800 l, eine mit einem Rührwerk.

Optional wurde für die Versuche zur Aufkonzentrierung eine Polymerdosierung vorgesehen.

4.7 Anaerobe Schlammstabilisierung

Um die Phosphor-Bilanzierung über die zuvor beschriebene Verfahrensführung zur Abwasserreinigung und die dabei relevanten Stoffströme hinaus in der Praxis untersuchen zu können, wurde zeitweise eine anaerobe Schlammstabilisierung betrieben. Es wurde ein Faulbehälter im Versuchsmaßstab mit 274 l Volumen installiert. Für entsprechend berechnete Volumenströme des Primär- und Überschussschlammes wurde eine Faulzeit von 20 Tagen abgebildet.

Der Rohschlamm (Mischung Primär- und Überschussschlamm) sowie Faulschlamm wurde 2x / Woche beprobt und es wurden die Parameter TR, oTR und P_{ges} analysiert.

4.8 Bilder der Versuchsanlage

Die folgenden Bilder zeigen wesentliche genutzte Verfahrensstufen, die Online-Messungen und Probenahmestellen auf der Versuchsanlage.



Siebrechen, Sandfang, Vorklärung (PN 1)



Belebungsbecken 1 und 2 (PN 2 & 3)



Nachklärbecken 1 (NK 1)



Ablauf NK 1 und 2 mit Messtelle und automatischem Probennehmer (PN 4)



Fällungsreaktor mit Dosiertechnik



Flockungsreaktor mit Messtelle und automatischem Probennehmer (PN 5)



Sandfilter, IBC für Spülwasser und automatischem Probennehmer (PN 6 & 8)



Trommelfilter, IBC für Spülwasser und automatischem Probennehmer (PN 7 & 9)



Trommelfilter bei Füllung, Tuch PES-14



Dekanter (Alfa Laval, Aldec 10; PN 10)

Abbildung 4-6: Bilder der Versuchsanlage

5 Untersuchungs- und Messprogramm

5.1 Übersicht über die durchgeführten Untersuchungen

Im Wesentlichen wurden bei der Nachfällung und Fällschlammseparation nachfolgende Untersuchungen durchgeführt:

- Versuche mit Einsatz unterschiedlicher Fällmittel, Erprobung von Eisen- und Aluminiumsalzen

Eingesetzt wurden in den Versuchsphasen Eisen-III-chloridsulfat (Produkt Ferrifloc der Fa. Kronos, Produktdatenblatt Anlage 1) und Aluminiumsulfat (Produkt Brenntafloc AS 4 der Fa. Brenntag, Produktdatenblatt in Anlage 2). Mit Einsatz beider Fällmittel wurde die Nachfällung und die Verwertbarkeit des dabei gewonnenen Fällschlammes untersucht.

- Versuche mit Anpassung des Automatisierungskonzeptes und der Zielwerte für die chemische Phosphorelimination

Gemäß Kapitel 4.3 wurde die Fällmitteldosierung nach der online gemessenen Phosphat-Konzentration geregelt. Dabei wurden unterschiedliche Zielwerte untersucht. Als Zielwerte wurden Konzentrationen von 0,7 mg/l, 0,5 mg/l und 0,1 mg/l eingestellt.

- Versuche mit Steigerung der zu fällenden P-Konzentration bzw. P-Fracht

Die zu fällende P-Konzentration schwankt entsprechend der Zulaufkonzentration, dies ist bei der Nachfällung im Vergleich zur Simultanfällung weniger ausgeprägt. Auf der Technikumsanlage zeigten sich mit Außerbetriebnahme der Simultanfällung und der vermehrten Bio-P geringe Phosphorablaufkonzentration im Ablauf der Belebungsstufe. Es fand eine hohe P-Inkorporation im Belebtschlamm statt. Anaerobe Verhältnisse in der Belebungsstufe wurden überprüft. Zur Untersuchung definierter und üblicher Zulaufkonzentrationen wurde Phosphorsäure eingesetzt. Mit unterschiedlichen Zulaufeinstellungen und Zielwerten variieren die zu fällenden Frachten.

- Versuche mit Einsatz von Sandfilter und Trommelfilter zur Feststoffabscheidung

Die Aggregate zur Feststoffabscheidung der Nachfällung wurden parallel betrieben und jeweils mit einem Teilstrom aus dem Flockungsreaktor beschickt. Der Ablauf der Filteranlagen wurde jeweils separat beprobt und analysiert. Für das Spülwasser beider Filteranlagen wurden jeweils Vorlagen installiert, es erfolgte ebenfalls eine separate Beprobung und Analyse. Es wurde eine unterschiedliche hydraulische Beschickung der Filteranlagen und mit den unterschiedlichen Zielwerten der Fällung auch unterschiedliche Feststoffbeladungen untersucht.

- Versuche zur Aufkonzentrierung/Aufbereitung des Fällschlammes

Chargenweise wurde jeweils die Aufkonzentrierung des Spülwassers des Sandfilters und des Trommelfilters erprobt. Dabei wurden Versuche ohne und exemplarisch auch

mit Einsatz von Polymer durchgeführt (Produkt Praestol K 332 L der Fa. Solens, Produktdatenblatt in Anlage 3).

- Versuche zur anaeroben Stabilisierung

Zur Vervollständigung der Bilanzierung der Phosphorströme über die Abwasser- und Schlammbehandlung wurde der Untersuchungsrahmen in Versuchsabschnitten um den Betrieb einer kleinformatigen Faulung erweitert.

Nachfolgend werden zur besseren Nachvollziehbarkeit ergänzend weitere Versuchseinstellungen beschrieben. Die detaillierte Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgt im nachfolgenden Kapitel 6.

Die Untersuchungen zu den Verwertungspotentialen des gewonnenen Stoffstroms werden in einem separaten Kapitel beschrieben und ausgewertet (Kapitel 7).

5.2 Versuche zur Nachfällung und Fällschlammseparation, Aufstockung mit Phosphorsäure

Die Beprobung und Analysen zeigen mit Versuchsbeginn unerwartet geringe Phosphorkonzentrationen im Ablauf der Belebungsanlage. Die Simultanfällung wurde zuvor abgeschaltet. Restliches Fällmittel und Fällschlamm der Belebungsstufe werden in der Einfahrphase der Anlage ausgetragen.

Der unbelüftete Bereich der Belebungsbecken wurde auf 25 % Volumenanteil reduziert, um anaerobe Zonen zu vermeiden und eine vermehrte biologische Phosphorbindung zu unterdrücken.

Die Restsauerstoffkonzentrationen und Nitratwerte wurden in den Beckenabschnitten an jeweils sechs Messpunkten analysiert, um günstige Randbedingungen für die vermehrte biologische Phosphorbindung auszuschließen. Es wurden keine anaeroben Zonen festgestellt. Die Nitratkonzentrationen lagen bei i. M. 8,1 mg/l. Die damit gegebenen anoxischen Bedingungen lassen in der Theorie keine vermehrte biologische Phosphorbindung zu.

Um repräsentative und einstellbare Phosphorkonzentrationen im Ablauf der Nachklärung zu erzielen, wurde Phosphorsäure eingesetzt. Im Rahmen der Versuchsdurchführung ist eine Aufstockung mit 85%-iger Phosphorsäure (H_3PO_4) ab dem 21.04.2021 realisiert worden. Als Dosierstelle wurde der Ablauf der Vorklärung, nach der Probenahmestelle (PN 1) gewählt, womit eine repräsentative Aufkonzentrierung und gute Einmischung erzielt werden. Ziel war eine Erhöhung der zu fällenden Phosphat-Konzentration um ca. 2 mg/l bzw. eine Ausgangskonzentration in Größenordnung von ca. 3 bis 4 mg/l zur Nachfällung. Die erforderliche Dosierung wurde rechnerisch mit Bezug auf den eingestellten Zulauf zur Kläranlage ermittelt und im Laufe der Untersuchungen angepasst. Die Phosphorsäuredosierung lag zwischen 96 ml/h und 156 ml/h (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Dosiermengen der Phosphorsäure im Versuchszeitraum

Datum	Dosiermenge der Phosphorsäure ml/h	Bemerkung
21.04.2021	96	Start Phosphorsäuredosierung
16.07.2021	0	Phosphorsäuredosierung aus (Störung der Zulaufpumpen u. Fällmitteldosieranlage)
26.07.2021	142	
15.09.2021	96	Phosphorsäuredosierung verringert
18.10.2021	142	Phosphorsäuredosierung erhöht
23.12.2021	156	Phosphorsäuredosierung erhöht

Im Zulauf der Nachfällung ergeben sich die Phosphorkonzentrationen aus der Phosphorkonzentration im Ablauf der Vorklärung zuzüglich der Aufstockung mit Phosphorsäure nach der Probenahme, abzüglich der Phosphor-Inkorporation in der biologischen Stufe. Im Mittel liegt die Phosphor-Inkorporation während der Aufstockung mit Phosphorsäure zwischen dem Ablauf der Vorklärung und dem Zulauf der Nachfällung bei ca. 60 % (Abbildung 5-1).

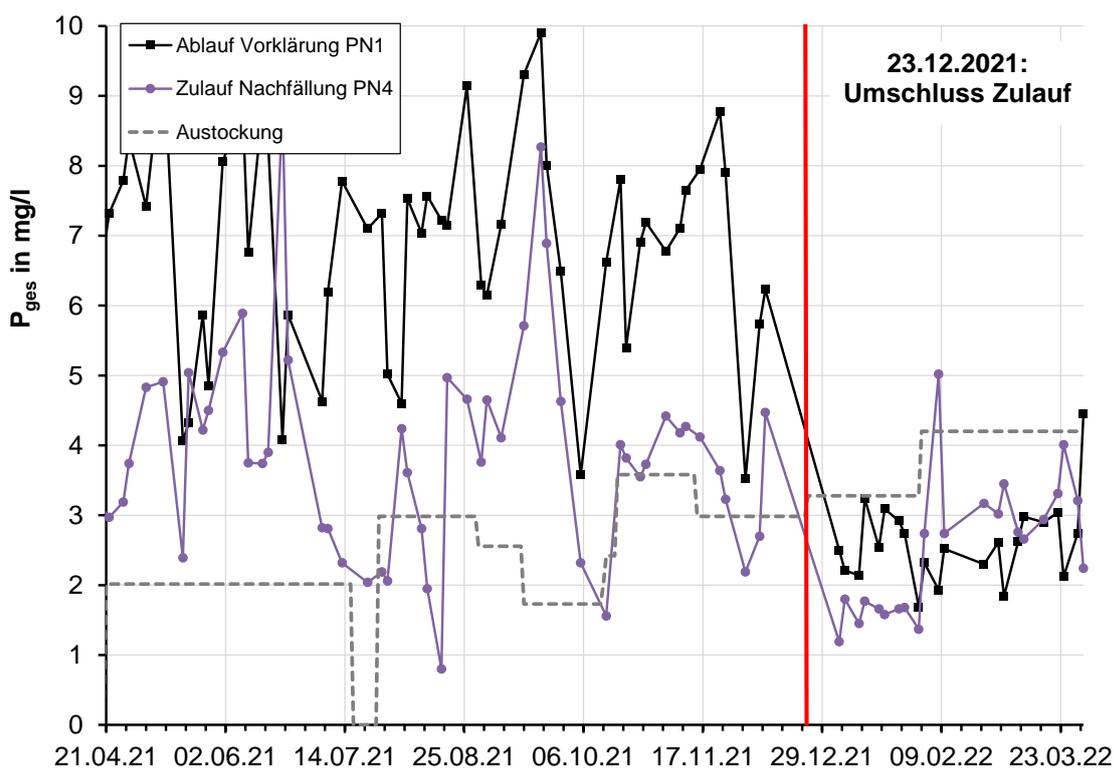


Abbildung 5-1: P-Konzentration im Ablauf der Vorklärung und Zulauf zur Nachfällung, Phosphorsäuredosierung zur Aufstockung

5.3 Versuche mit Einsatz von Sandfilter und Trommelfilter zur Feststoffabscheidung

Mit dem Parallelbetrieb der Filteranlagen wurde die Fällschlammabscheidung fortlaufend untersucht.

Im Rahmen des Versuchsbetriebes der Filteranlagen wurde weiterhin eine gezielte Erprobung der hydraulischen Leistungsfähigkeit und der damit einhergehenden Variation der Filtergeschwindigkeiten beabsichtigt. Tabelle 5-2 zeigt das geplante Versuchsprogramm.

Tabelle 5-2: Geplantes Versuchsprogramm zur Erprobung der hydraulischen Beschickung der Filteranlagen und Filtergeschwindigkeiten

Einstellung	Sandfilter		Trommelfilter		Summe
	Zulauf	Filtergeschwindigkeit	Zulauf	Filtergeschwindigkeit	Zulauf, gesamt
	l/s	m/h	l/s	m/h	l/s
1	2	4,8	2	3,6	4
2	3	7,2	3	5,4	6
3	4	9,6	2	3,6	6
4	5	12	2	3,6	7
5	6	14,4	1	1,8	7
6	7	16,8	0	0	7
7	2	4,8	4	7,2	6
8	2	4,8	5	9	7
Auslegungswert (max.)		15		8	

5.4 Versuche zur Aufkonzentrierung des Fällschlammes

Mit Hilfe der Dekantierzentrifuge sind die Spülschlämme des Sandfilters (SF) und des Trommelfilters (TF) maschinell aufkonzentriert worden.

Insgesamt wurden 14 Versuche durchgeführt. Zwei Versuche fanden dabei bei einer Nachfällung mit Eisen-III-chloridsulfat (Ferrifloc) und zwölf Versuche bei vorheriger Nachfällung mit Aluminiumsulfat (Brenntafloc AS 4) statt. Von den zwölf Entwässerungsversuchen mit dem Fällmittel Brenntafloc AS 4 sind vier Versuche mit Dosierung eines polymeren Flockungsmittels (pFM) durchgeführt worden. Dazu wurde das Flockungsmittel Praestol™ K 332 eingesetzt. Das polymere Flockungsmittel ist durch die Firma Solenis, abgestimmt auf den zu entwässernden Schlamm, ausgewählt worden. Tabelle 5-3 zeigt die durchgeführten Versuchsreihen.

Tabelle 5-3: Durchgeführte Entwässerungsversuche

Datum	Entwässerter Spülschlamm		Polymeres Flockungsmittel (pFM)		Fällmittel	
	SF	TF	ohne pFM	mit pFM	Ferrifloc	Brenntafloc AS4
22.04.2021	x	x	x		x	

Datum	Entwässerter Spülschlamm		Polymeres Flockungsmittel (pFM)		Fällmittel	
	SF	TF	ohne pFM	mit pFM	Ferrifloc	Brenntafloc AS4
17.06.2021	x	x	x		x	
23.06.2021	x		x			x
24.06.2021		x	x			x
29.07.2021	x	x	x			x
05.08.2021	x	x	x			x
15.09.2021	x		x			x
16.09.2021	x		x			x
22.11.2021	x		x			x
23.11.2021	x		x			x
01.12.2021	x			x		x
03.12.2021	x			x		x
01.03.2022	x			x		x
03.03.2022	x			x		x

5.5 Praktische Versuche zur anaeroben Schlammbehandlung

Die Untersuchungen wurde zur Erweiterung der Bilanz zeitweise um den Betrieb einer anaeroben Stabilisierung Analysen für einen Teilstrom ergänzt. Ein kleinformatiger Faulbehälter mit 274 l Volumen wurde chargenweise mit Primär- und Überschussschlamm beschickt. Die Beschickung erfolgte dabei für eine organische Raumbelastung von 1,5 g oTR/(l · d) und eine Aufenthaltszeit von 20 Tagen als wesentliche Auslegungsgrößen, maßgebend war dabei die Aufenthaltszeit. Tabelle 5-4 zeigt die wesentlichen Kenndaten sowie die Ermittlung der chargenweisen Beschickung des Faulbehälters für die genannten Auslegungswerte.

Tabelle 5-4: Beschickung des Faulbehälters

Auslegungswerte	organische Raumbelastung	1,5	g oTR/(l·d)
	hydraulische Verweilzeit (HRT)	20	d
	Arbeitsvolumen	274	l
Schlammcharakteristik	oTR-Gehalt Primärschlamm	40,29	g oTR/l
	oTR-Gehalt Überschussschlamm	15,3	g oTR/l
	Anteil PS gemäß DWA-A 131	0,6	[-]
	Anteil ÜS gemäß DWA-A 131	0,4	[-]
Auslegung mit der Raumbelastung	gesamte zulässige organische Fracht pro Tag	411,0	g/d
	Fracht PS	243,5	g/d
	Fracht ÜS	167,5	g/d
	Menge PS	6,0	l/d
	Menge ÜS	10,9	l/d
	Summe	17,0	l/d
	Anteil PS an Schlamm	36%	
	Anteil ÜS an Schlamm	64%	
Auslegung mit HRT	Zulässige Schlammmenge gemäß HRT	13,7	l/d
	Menge PS	4,9	l/d
	Menge ÜS	8,8	l/d

5.6 Messprogramm

Tabelle 5-5 zeigt das reguläre Messprogramm, das in Abhängigkeit der jeweiligen Versuchsphase angepasst bzw. ergänzt wurde.

Tabelle 5-5: Messprogramm

Probenahmeort	Analysen je Woche														
	Zulauf KA	Belebtschlamm BB1	Belebtschlamm BB2	Zulauf Nachfällung	Ablauf Nachfällung	Ablauf Sandfilter	Ablauf Tuchfilter	Spülwasser Sandfilter	Spülwasser Tuchfilter	Aufkonzentrierter Fällschlamm	Stichproben zur Gerätekalibrierung				
PN-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	2	3	4	5	
Probenart	MP	SP	SP	MP	MP	MP	MP	SP**	SP**	SP**	SP	SP	SP	SP	
Probennahmetechnik bzw. -vorlage	autom. Probennehmer			autom. Probennehmer	autom. Probennehmer	autom. Probennehmer	autom. Probennehmer	IBC	IBC						
P _{ges}	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2					
o-PO ₄	2			2	2	2	2	2	2	2			1	1	
AFS	1			2	2	2	2	2	2	2					
CSB	2			2		2	2								
N _{ges}	1			1											
NH ₄ -N	1			1									1		
NO ₃ -N	1			1							1	1	1		
TS _{BB}											2	2			
oTS		1	1												
ISV		2	2												
Chlorid***				2	2										
Sulfat***				(2)	(2)										

▲ zstl. online-Messung
 *** sofern Bestandteil des jeweils eingesetzten Fällmittels

6 Auswertung der Versuchsergebnisse

6.1 Bewertung der grundsätzlichen Funktion der Nachfällung

Für das Verfahrenskonzept gilt es eingangs zu überprüfen, ob die Phosphorelimination im Sinne des primären Ziels der Abwasserreinigung mit einer alleinigen Nachfällung möglich ist. Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse zeigen, dass auch mit alleiniger Nachfällung eine gute Phosphorelimination erreicht wird. Mit der Fällung konnten Zielwerte im Ablauf von 0,1 mg/l Phosphat eingehalten werden. Der Fällmittelverbrauch lag dabei in einem üblichen Bereich (Abschnitt 6.2.2).

Weiterhin gilt es eingangs zu prüfen, ob bei der alleinigen Nachfällung ein zur Feststoffabscheidung geeigneter Fällschlamm entsteht und ob der Feststoffrückhalt mit konventionellen Filteranlagen möglich ist. Hintergrund ist, dass ein vergleichbarer Schlamm, in dem wie bei der Simultanfällung die Fällreaktion inkl. der Mikro- und Makroflockenbildung stattfindet, bei der Nachfällung nicht vorhanden ist. Vielmehr wird im nahezu feststofffreien Ablauf der Nachklärung bei der Nachfällung der Tertiärschlamm gebildet. Es könnten im ungünstigen Fall schwer abscheidbare Fällprodukte entstehen. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse zeigen jedoch die grundsätzlich gute Abscheidung des gebildeten Fällschlammes mit den Filteranlagen. Es wurden übliche Konzentrationen abfiltrierbarer Stoffe im Ablauf der Filteranlagen erreicht (Abschnitt 6.2.4).

Voraussetzung, sowohl für die Erzielung der Elimination des Gesamtphosphors inkl. dem gebundenen Phosphors als auch hinsichtlich der Fällschlammabscheidung ist ein regulärer Betrieb der Filteranlagen. Auf der Versuchsanlage traten, insbesondere bis zum Umbau des Zulaufs im Dezember 2021, Betriebsstörungen auf. In Verbindung mit der begrenzten Leistungsfähigkeit der vertikalen Nachklärbecken der Versuchsanlage kam es deshalb phasenweise zu Überlastungen und einem instabilen Betrieb der Filteranlagen. Diese sind jedoch nicht dem Verfahrenskonzept geschuldet, sondern haben ihre Ursache in betrieblichen und technischen Rahmenbedingungen der genutzten Versuchsanlage.

6.2 Bewertung der Phosphorelimination und zugehörigen Teilergebnisse

6.2.1 P-Konzentrationsverlauf über die Anlage (Laboranalytik)

Abbildung 6-1 und Abbildung 6-2 zeigen die Ergebnisse der Laboranalysen für die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentration und P_{ges} -Konzentration in den untersuchten Stoffströmen.

Im Zulauf liegt etwa die Hälfte des Gesamtphosphors als Orthophosphat vor. Nach Umschluss des Zulaufs liegt eine geringere P_{ges} -Belastung vor. Die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen im Zulauf der Nachfällung liegen nach Umschluss über den Konzentrationen im Ablauf der Vorklärung, was anteilig mit der im Ablauf der Vorklärung dosierten Phosphorsäure erklärt werden kann. Die

aufgetretene große Abweichung kann weiterhin mit einer vermehrten Hydrolyse über die Anlage mit veränderter Abwassercharakteristik oder Rücklöseprozessen, trotz eigentlich unterbundener vermehrter Bio-P, erklärt werden.

Die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen im Ablauf der Nachfällung und der Filteranlagen schwanken je nach eingestelltem Zielwert in den Versuchsphasen. In den Versuchsphasen wurden $\text{PO}_4\text{-P}$ -Zielwerte zwischen 0,1 und 0,7 mg/l erprobt. Im Mittel liegen die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Laboranalysen bei 0,41 mg/l. Die Ergebnisse werden im nachfolgenden Abschnitt für die Versuchsphasen mit unterschiedlichem Fällmittel und für unterschiedliche Zielwerte im Detail anhand der online-Messungen bewertet. Orthophosphat kann demnach mit alleiniger Nachfällung entsprechend den Zielgrößen eliminiert werden. Erwartungsgemäß liegen die $\text{PO}_4\text{-P}$ -Werte im Ablauf der Nachfällung und im Ablauf der Filteranlagen in ähnlicher Größenordnung.

Die P_{ges} -Elimination erfolgt über die Abscheidung des Fällschlammes in den Filteranlagen. Wie im letzten Abschnitt ausgeführt, lag zeitweise störungsbedingt Schlammabtrieb im Ablauf der Nachklärung und damit verbunden eine unzureichende Leistung der Filteranlagen vor. Die erhöhten Werte sind nicht auf das Verfahrenskonzept zurückzuführen.

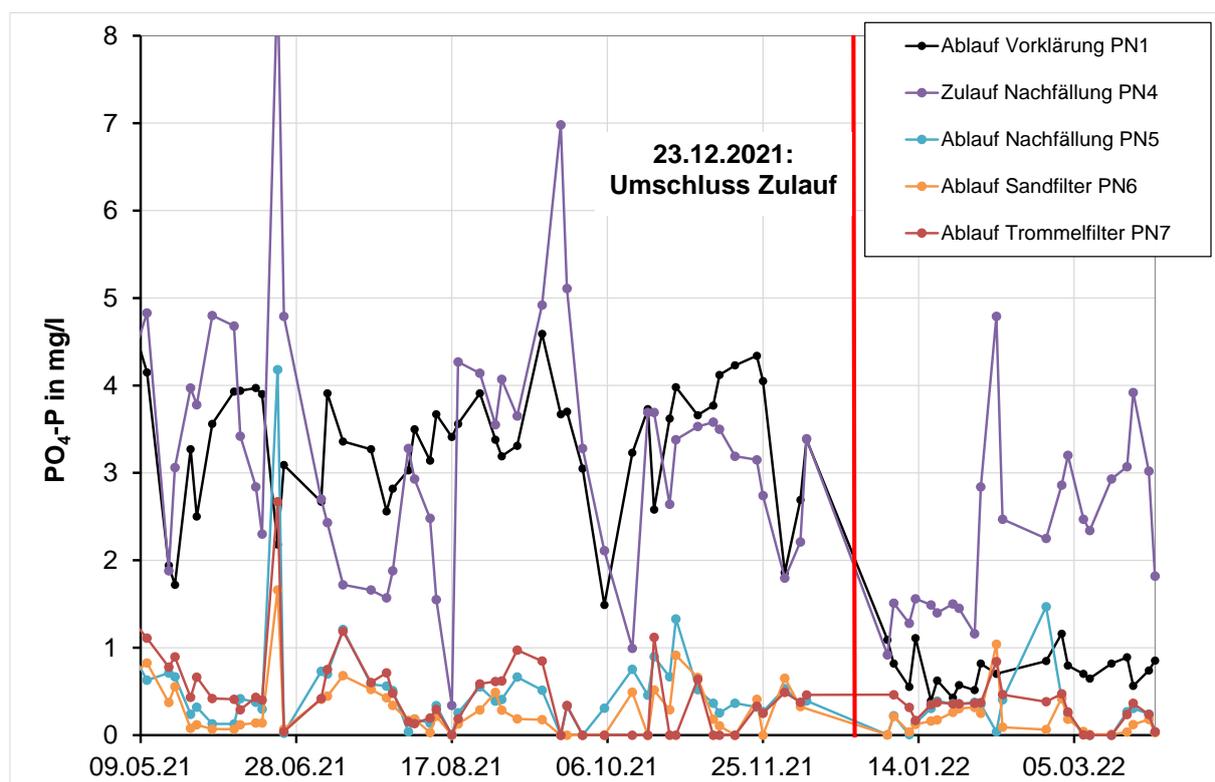


Abbildung 6-1: $\text{PO}_4\text{-P}$ -Konzentrationen im Zulauf zur Belebung, vor und nach der Fällung sowie im Ablauf der Filteranlagen

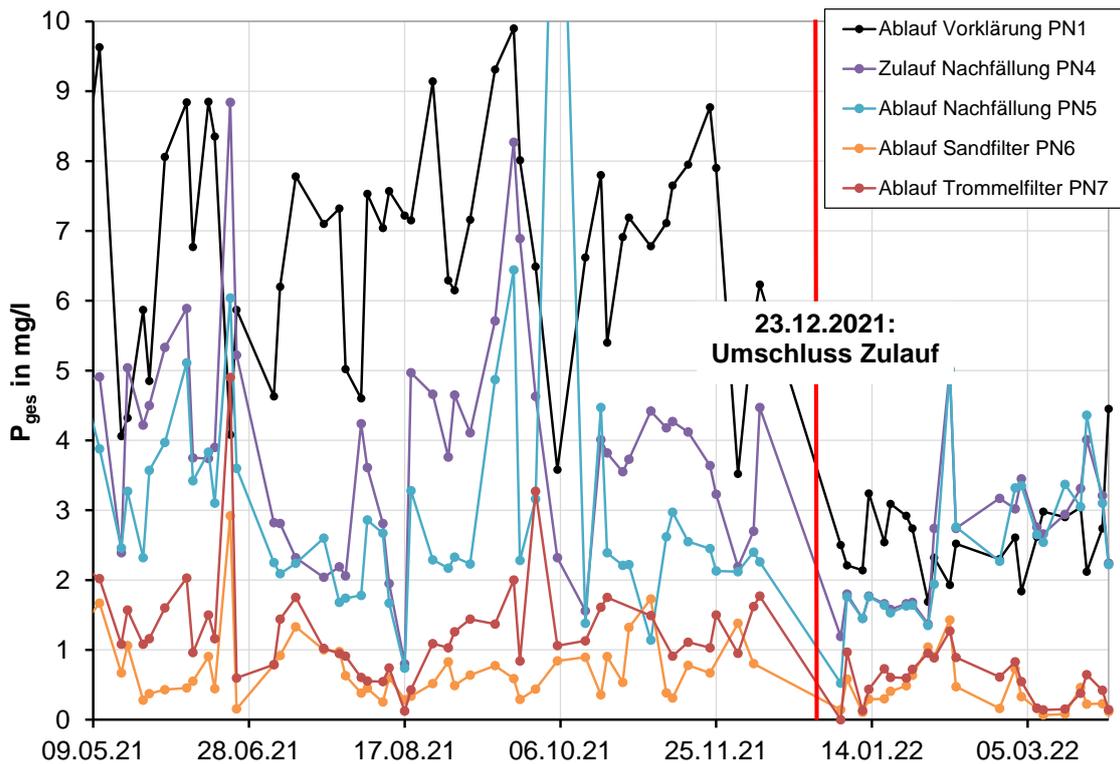


Abbildung 6-2: P_{ges} -Konzentrationen im Zulauf zur Belebung, vor und nach der Fällung sowie im Ablauf der Filteranlagen

6.2.2 Fällmitteleinsatz für verschiedene Zielwerte

Im Folgenden werden, für die eingesetzten Fällmittel Eisen-III-chloridsulfat und Aluminiumsulfat, die Ergebnisse der Versuche zur Nachfällung mit unterschiedlichen Zielwerten anhand der online-Messungen und dem Fällmittelverbrauch dargestellt.

Als Zielwerte wurden Konzentrationen von 0,7 mg/l, 0,3 mg/l und 0,1 mg/l PO_4 -P im Ablauf der Nachfällung untersucht. Die Auswertung des spezifischen Fällmittelverbrauchs erfolgt über den kontinuierlich ermittelten β -Wert. Es erfolgt eine fortlaufende Bestimmung aus der geregelten Fällmitteldosierung, den Kennwerten des Fällmittels sowie der Bilanzierung des zu fällenden Phosphors mit den online P-Messungen vor und nach der Fällung sowie dem Durchflussmesswert.

6.2.2.1 Versuche mit Eisen-III-chloridsulfat

Abbildung 6-3 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit dem Zielwert von 0,7 mg PO_4 -P/l im Ablauf der Nachfällung. Der Zielwert wird erreicht. Bei zu fällenden PO_4 -P-Konzentrationen von ca. 1,6 bis 5,5 mg/l im Ablauf der Nachklärung bzw. im Zulauf zur Nachfällung ergibt sich ein mittlerer β -Wert von 2.

In Abbildung 6-4 sind die Ergebnisse der Versuche mit einem Zielwert von 0,3 mg PO₄-P/l im Ablauf der Nachfällung dargestellt. Die zu fällende PO₄-P-Konzentration liegt in einem Bereich von 2,8 bis 3,7 mg/l. Der β-Wert liegt im Mittel bei 2,7.

Im Zeitraum der Versuche mit einem Zielwert von 0,1 mg PO₄-P/l im Ablauf der Nachfällung kam es vermehrt zu Betriebsstörungen auf der Versuchsanlage. Die verbleibenden Versuchszeiträume mit regulärem Anlagenbetrieb zeigen jedoch, dass auch dieser Zielwert mit der ausschließlichen Nachfällung erreicht werden kann. Der Nachweis über einen längeren Betriebszeitraum steht aus. Bei zu fällenden PO₄-P-Konzentrationen von 3,9 bis 5,7 mg/l wird für den Zielwert 0,1 mg PO₄-P/l mit ausschließlicher Nachfällung ein β-Wert von im Mittel 5,7 erforderlich.

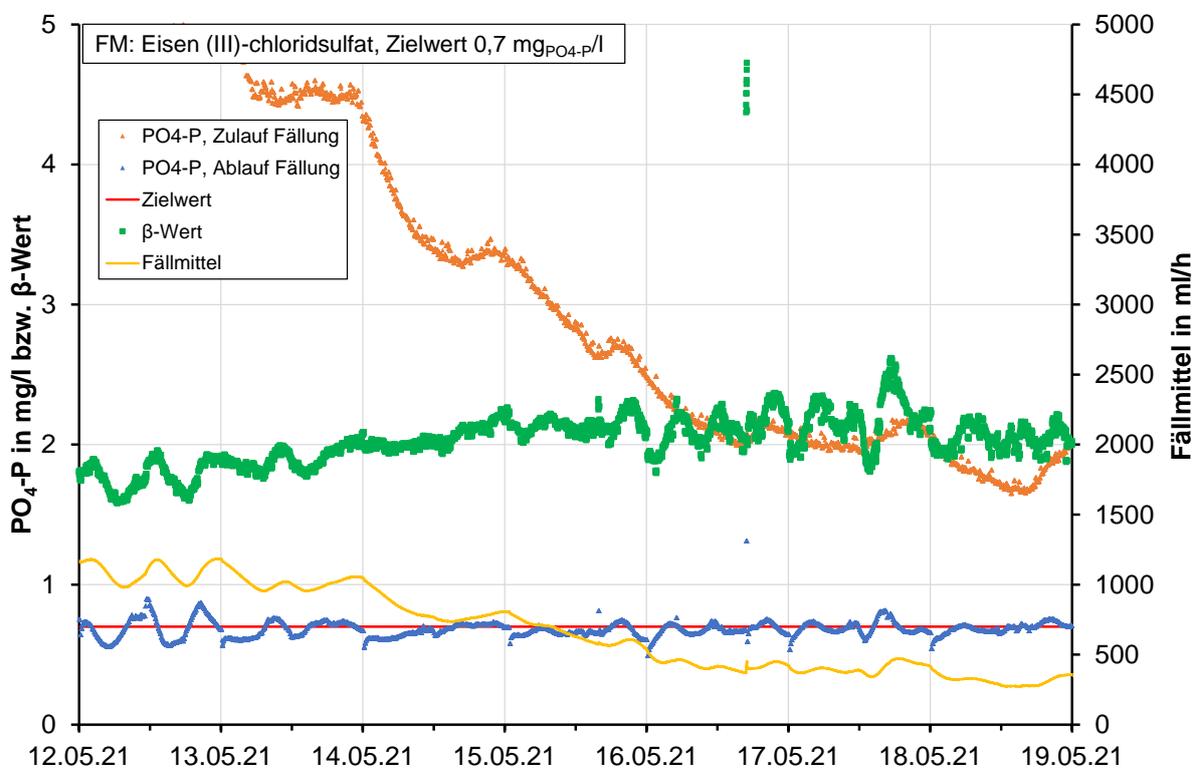


Abbildung 6-3: Versuche mit Zielwert 0,7 mg/l (Fällmittel Eisen(III)-chloridsulfat)

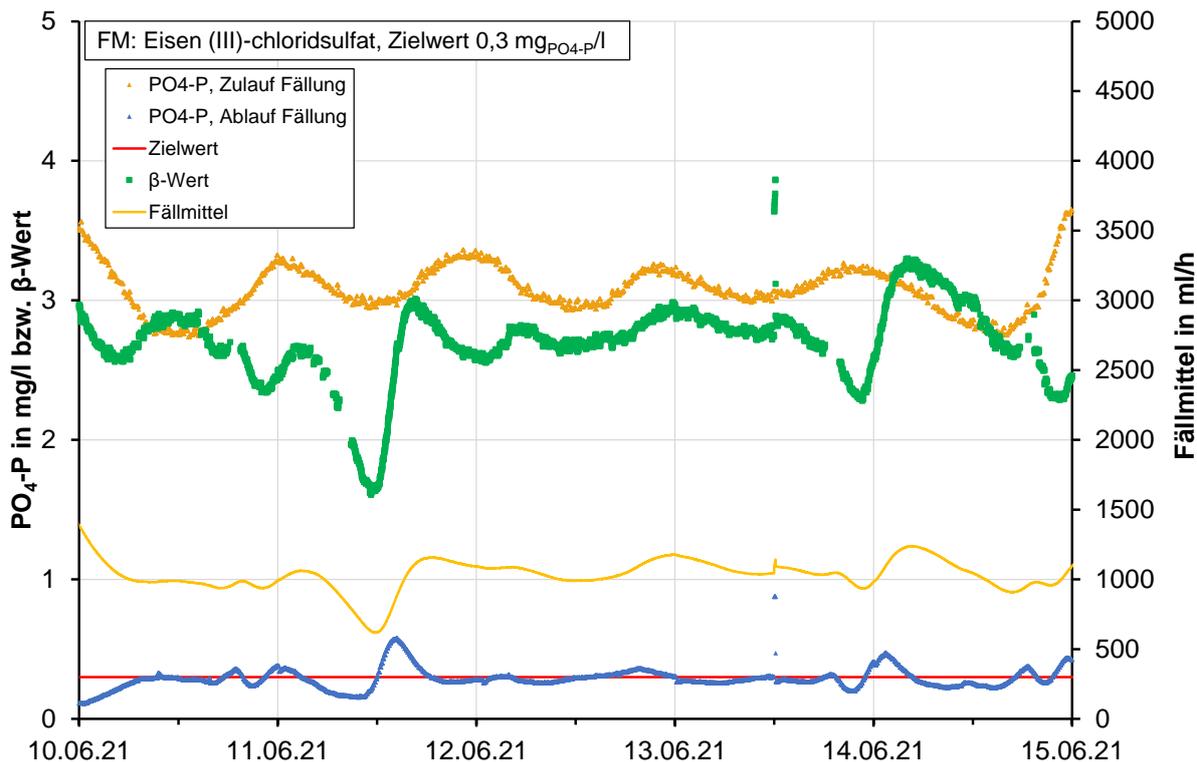


Abbildung 6-4: Versuche mit Zielwert 0,3 mg/l (Fällmittel Eisen(III)-chloridsulfat)

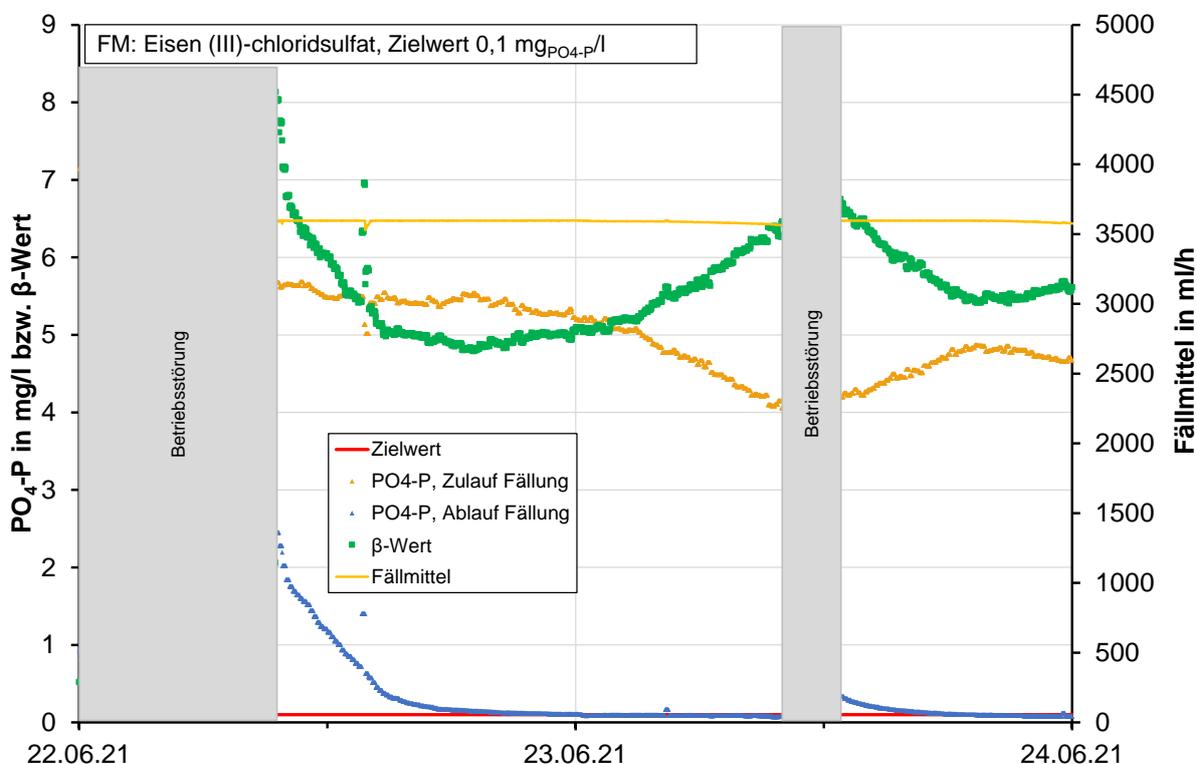


Abbildung 6-5: Versuche mit Zielwert 0,1 mg/l (Fällmittel Eisen(III)-chloridsulfat)

6.2.2.2 Versuche mit Aluminiumsulfat

Abbildung 6-6 bis Abbildung 6-8 zeigen die Ergebnisse der Versuche mit Einsatz von Aluminiumsulfat als Fällmittel für die Zielwerte vom 0,7 mg/l, 0,3 mg/l und 0,1 mg/l PO₄-P im Ablauf der Nachfällung.

Die Zielwerte werden auch in diesen Versuchsreihen erreicht.

Beim Zielwert 0,7 mg PO₄-P/l im Ablauf der Nachfällung ergibt sich bei zu fällenden PO₄-P-Konzentrationen zwischen 1,1 und 3,8 mg/l ein β -Wert von im Mittel 2,2 (Abbildung 6-6). Nach Betriebsstörungen am Ende des Versuchszeitraums (Zeiträume ohne β -Werte) ergibt sich zeitweise zunächst ein höherer Fällmitteleinsatz. Die Fällmitteldosierung bekommt vom Automatisierungskonzept nach Störungen zunächst einen hohen Sollwert vorgegeben, der erst langsam runter geregelt wird. Dies ist ein Ansatzpunkt für weitere Optimierungen.

Für den Zielwert von 0,3 mg PO₄-P/l (Abbildung 6-7) im Ablauf der Nachfällung stellt sich bei zu fällenden PO₄-P-Konzentratione von ca. 1,1 bis 7,5 mg/l ein mittlerer β -Wert von 2,7 ein. Vom 04.10. bis 12.10. waren Anlagenteile außer Betrieb, weshalb für diesen Zeitraum kein β -Wert angegeben ist.

Der Zielwert 0,1 mg PO₄-P/l (Abbildung 6-8) wird mit einem mittleren β -Wert von 3,8 erreicht. Die starken Schwankungen der Fällmitteldosierung sind auch in diesem Fall durch Betriebsstörungen zu erklären (Zeiträume ohne β -Werte), nach denen die Fällmitteldosierung langsam runter regelt.

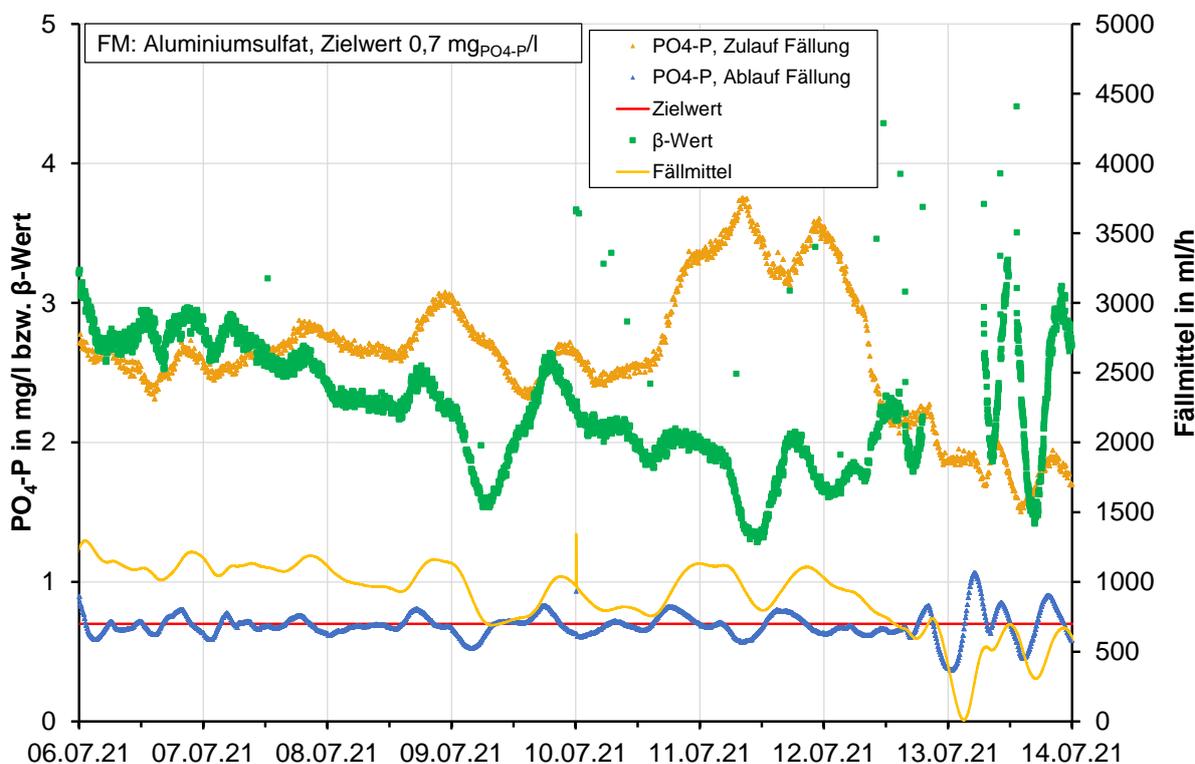


Abbildung 6-6: Versuche mit Zielwert 0,7 mg/l (Fällmittel Aluminiumsulfat)

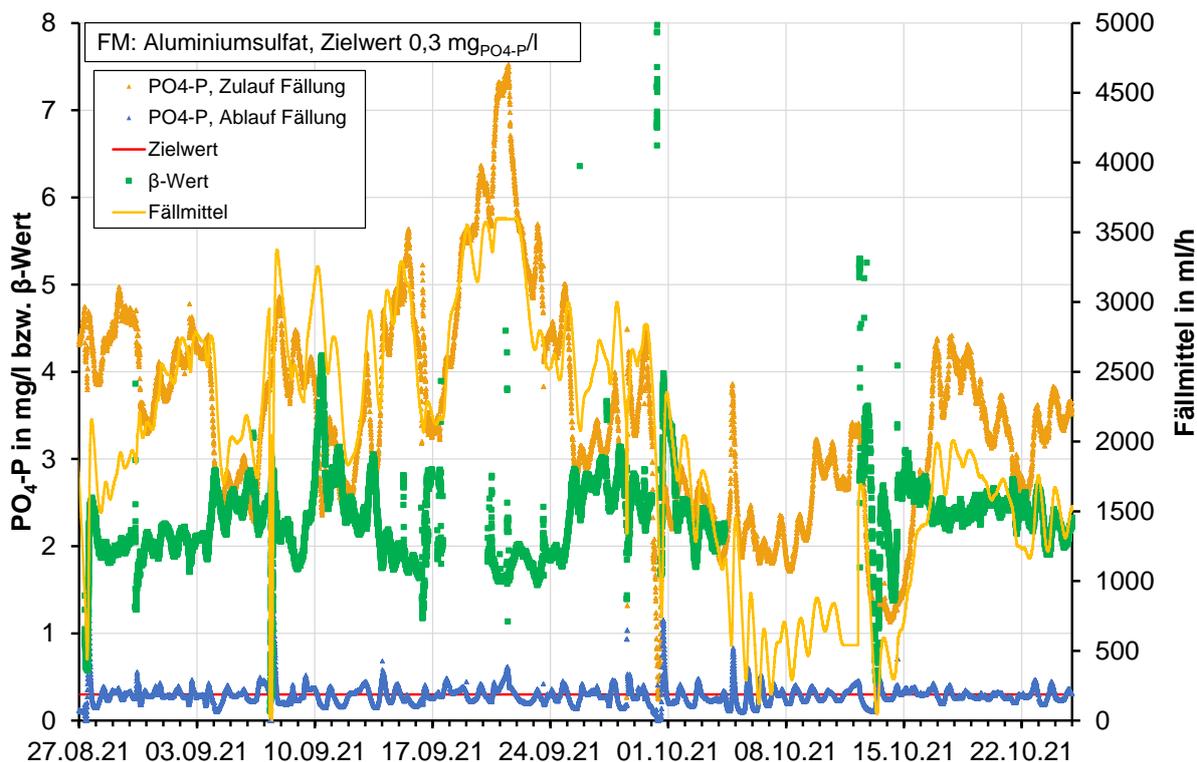


Abbildung 6-7: Versuche mit Zielwert 0,3 mg/l (Fällmittel Aluminiumsulfat)

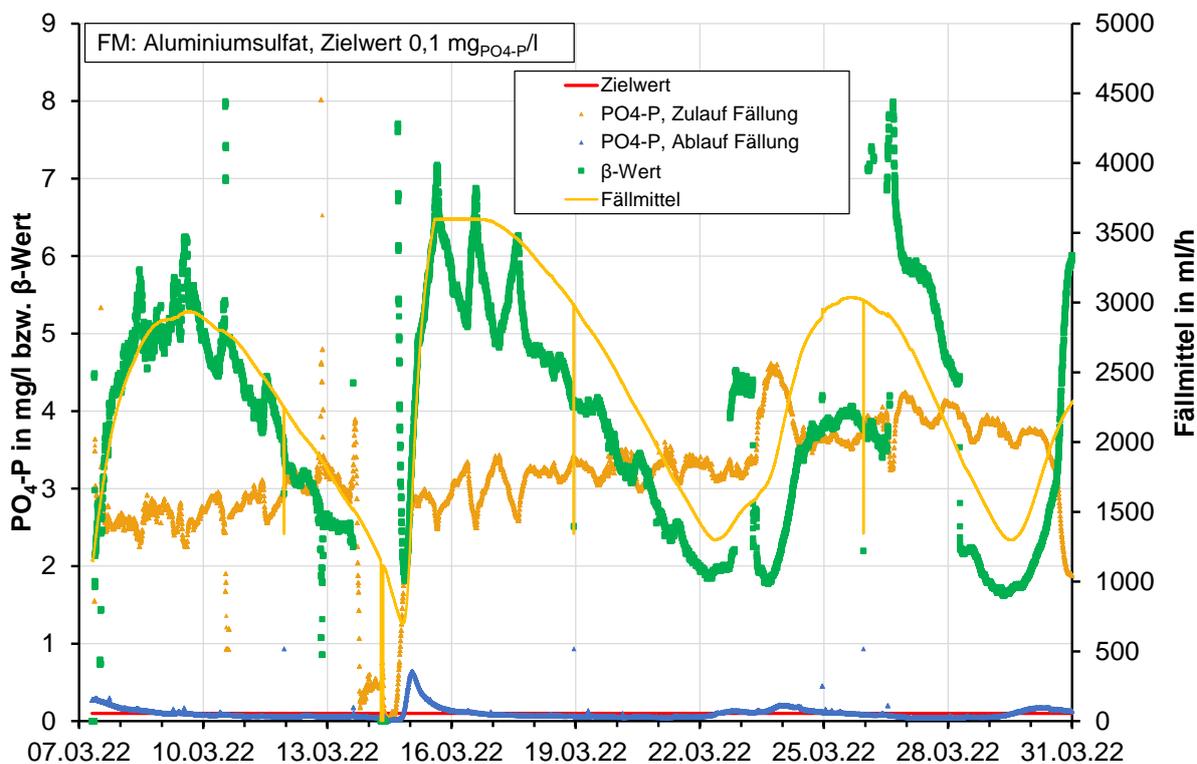


Abbildung 6-8: Versuche mit Zielwert 0,1 mg/l (Fällmittel Aluminiumsulfat)

Es zeigt sich, dass sowohl mit Einsatz von Eisen(III)-chloridsulfat als auch mit Aluminiumsulfat mit einer ausschließlichen Nachfällung niedrige $\text{PO}_4\text{-P}$ -Zielwerte im Ablauf erreicht werden können. Dies konnte auch bei hohen Ausgangskonzentrationen im Ablauf der Nachklärung bzw. Zulauf der Nachfällung gezeigt werden.

Der spezifische Fällmitteleinsatz steigt erwartungsgemäß mit Vorgabe niedriger Zielwerte. Bisherige Erfahrungswerte für den β -Wert bei der Nachfällung liegen bei 2,5 (DWA, 2011). Bis zum Zielwert von 0,3 mg $\text{PO}_4\text{-P/l}$ liegen die β -Werte der Versuche in einer vergleichbaren Größenordnung.

Abbildung 6-9 zeigt weitere Erfahrungswerte zum β -Wert auch bei weitergehenden Anforderungen mit geringen P-Ablaufwerten. Es ist davon auszugehen, dass in der Literaturquelle sowohl Werte der Simultan- als auch Nachfällung eingeflossen sind. Die Versuche mit Einsatz von Eisen(III)-chloridsulfat ergaben für den Zielwert 0,1 mg $\text{PO}_4\text{-P/l}$ einen β -Wert von im Mittel 5,7, waren jedoch von Betriebsstörungen geprägt. Die Versuche mit Einsatz von Aluminiumsulfat zeigten einen β -Wert von im Mittel 3,8, was nur geringfügig über den extrapolierten Werten der Literaturangabe liegt.

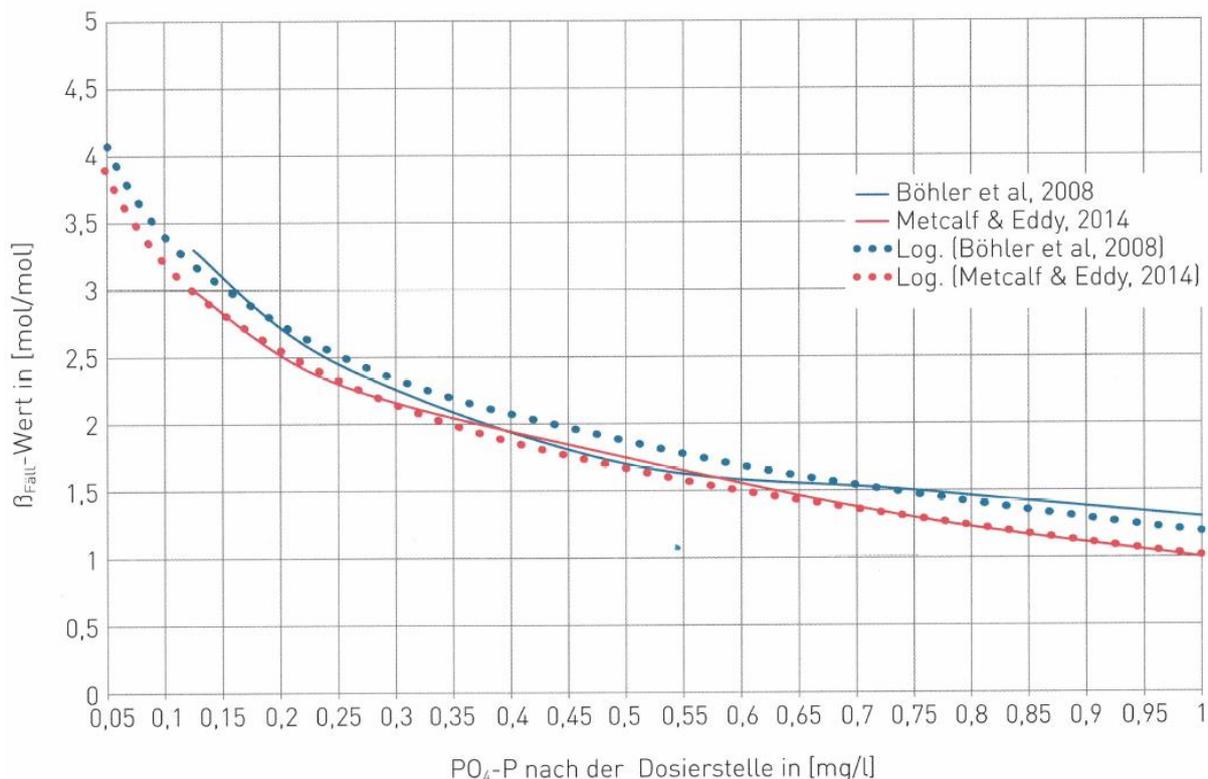


Abbildung 6-9: β -Werte in Abhängigkeit der P-Konzentration nach der Fällmittelzugabe (DWA, 2019)

6.2.2.3 Aufsalzung

Grundsätzlich ist mit Einsatz von Eisen- und Aluminiumsalzen zur Fällung die Aufsalzung zu beachten.

In der Oberflächengewässerverordnung (OGewV, 2016) werden als Anforderungen an den guten ökologischen Zustand und das gute ökologische Potential für Fließgewässer je nach Gewässertyp für Chlorid ≤ 200 mg/l und für Sulfat ≤ 75 bis 200 mg/l gefordert. Für den sehr guten ökologischen Zustand und das höchste ökologische Potential liegen die Werte für Chlorid ≤ 50 mg/l und für Sulfat ≤ 25 mg/l.

Die stichprobenartig untersuchte Chloridkonzentration zeigt bei Einsatz von Eisen(III)-chloridsulfat zur Nachfällung eine Erhöhung der Chloridkonzentration von im Mittel 31 mg/l. Bei Einsatz von Aluminiumsulfat ergibt sich eine Erhöhung von im Mittel 28 mg/l. Die Werte liegen in keinen kritischen Größenordnungen.

6.2.3 Fällschlammanfall

Die Schlammproduktion aus der Phosphorelimination wird gemäß DWA-A 131 (2016) wie folgt ermittelt:

$$\dot{U}_{d,P} = Q_{d,Konz} \cdot (3 \cdot X_{P,BioP} + 6,8 \cdot X_{P,Fäll,Fe} + 5,3 \cdot X_{P,Fäll,Al}) / 1000 \text{ (kg/d)}$$

Mit

$\dot{U}_{d,P}$ tägliche Schlammproduktion aus der Phosphorelimination in kg/d

$Q_{d,Konz}$ maßgebender täglicher Abfluss zur Berechnung der Konzentrationen aus Frachten in m^3/d

$X_{P,BioP}$ bei der biologischen Phosphorelimination biologisch gebundener Phosphor in mg/l

$X_{P,Fäll}$ durch Fällung eliminiertes Phosphor in mg/l

Der Feststoffanfall ist abhängig von der Art des Fällmittels und der Höhe der Dosierung. Gemäß DWA-A 131 (2016) wird eine Schlammproduktion von 2,5 kg TS pro kg zudosiertem Eisen und 4 kg TS pro kg zudosiertem Aluminium angesetzt. Unter Berücksichtigung der molaren Massen der Wirksubstanz, des Orthophosphats und einem β -Wert von ca. 1,5 ergeben sich die spezifischen Werte von 6,8 g TS/g $P_{gefällt}$ bei Einsatz von Eisen und 5,3 g TS/g $P_{gefällt}$ bei Einsatz von Aluminium in obiger Gleichung.

Abbildung 6-10 zeigt den gemessenen spezifischen Fällschlammanfall im Vergleich zu den Ansätzen nach DWA-A 131 (2016). Sowohl bei Einsatz von Eisen als auch bei Einsatz von Aluminium ergeben sich für den spezifischen Fällschlammanfall Werte über den Bemessungswerten der DWA-A 131 (2016). Für die Zielsetzung des Projektes ist dies unkritisch. Es ist nur

eine geringe Feststofffracht zur Phosphorrückgewinnung weiter zu behandeln, insbesondere im Vergleich zu Ansätzen im Rohschlamm / Faulschlamm. Mit Verifizierung des spezifischen Schlammanfalls ist der im Vergleich zu den Bemessungswerten höhere Schlammanfall bei der Auslegung der Filteranlagen beim P-Rec-Verfahren zu beachten.

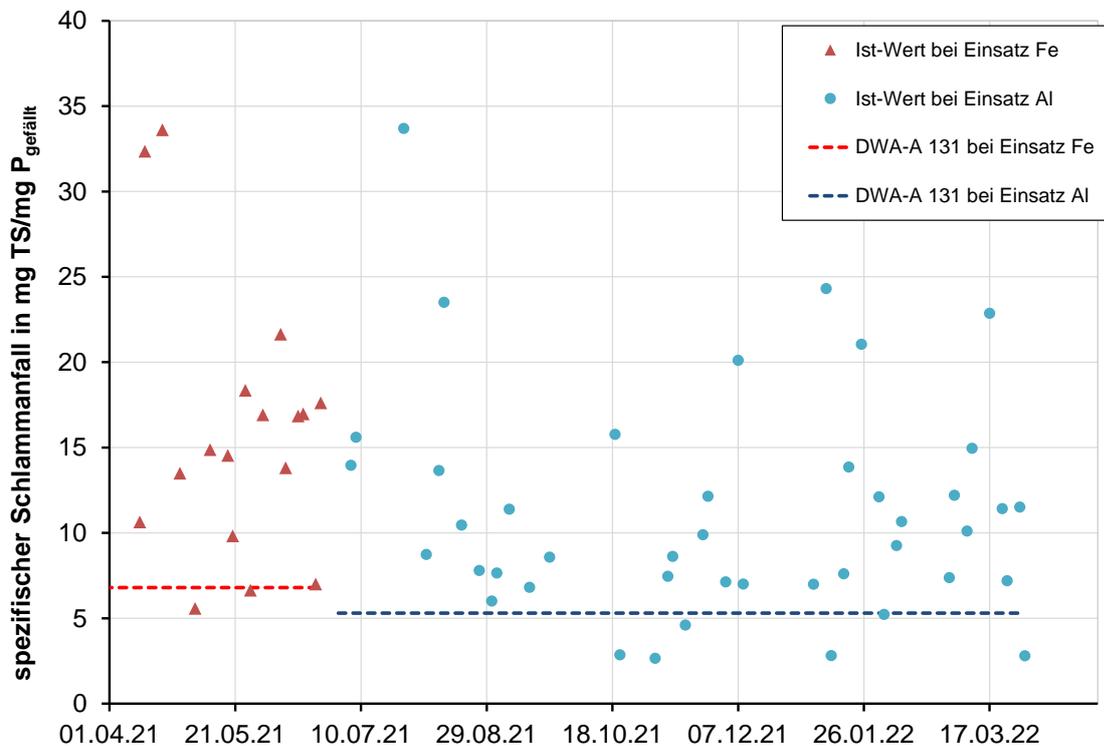


Abbildung 6-10: Vergleich des gemessenen spezifischen Fällschlammanfalls im Vergleich zu den Ansätzen nach DWA-A 131 (2016)

6.2.4 Fällschlammseparation und Leistung der Filteranlagen

Die Abscheidung des Fällschlammes in den Filteranlagen ist Voraussetzung zur Phosphorelimination inkl. des partikulär gebundenen Phosphors. Weiterhin gilt es mit dem Ziel der Phosphorrückgewinnung einen phosphorreichen Stoffstrom zu separieren. Mit der vorliegenden Anlagenkonstellation bildet das jeweilige Spülwasser der Filteranlagen den Stoffstrom zur Phosphorrückgewinnung.

6.2.4.1 Auswertung der Feststoffkonzentrationen

Abbildung 6-11 zeigt die analysierten AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung bzw. Zulauf der Nachfällung, im Ablauf der Nachfällung und im Ablauf der Filteranlagen.

Übliche AFS-Konzentrationen im Ablauf der Nachklärung liegen bei ca. 5 bis 10 mg/l. Der Auslegungswert einer Nachklärung nach DWA A-131 (2016) liegt bei 20 mg/l. Auch außerhalb der als Störung markierten Zeiträume zeigen die hier vorliegenden AFS-Konzentrationen eine ungenügende Leistung der Nachklärung (Mittelwert 15 mg/l). Es liegen einzelne AFS-Werte über 20 mg/l. Die hohen AFS-Werte im Ablauf der Nachklärung sind nicht auf untersuchte Verfahrenskonzepte zurückzuführen. Sie werden auf der genutzten Versuchsanlage, mit den relativ kleinen, vertikal durchströmten Nachklärbecken, häufig beobachtet und sind als Randbedingung für die Versuche zu sehen.

Mit dem bei der Nachfällung entstehenden Fällschlamm kommt es im Folgenden zu einer deutlichen Erhöhung der Feststofffracht. Im Ablauf der Nachfällung bzw. Zulauf der Filteranlagen liegen damit erwartungsgemäß hohe AFS-Konzentrationen vor (Mittelwert 45 mg/l).

Bei regulärem Anlagenbetrieb kann der Fällschlamm mit den Filteranlagen gut abgeschieden werden. Ein guter Wert für die Feststoffabscheidung von herkömmlich eingesetzten Filteranlagen liegt mit AFS-Werten von ca. 5 mg/l vor. Dieser Wert wird über den Gesamtzeitraum im Ablauf der Filteranlagen im Mittel nicht erreicht. Zu berücksichtigen sind bei der vorliegenden Anlagenkonstellation zum einen die schlechte Abscheideleistung der Nachklärung und zum anderen die erhebliche Feststoffbeladung mit dem Fällschlamm der ausschließlichen Nachfällung. Nach Umschluss der Anlage liegen bei stabilerem Anlagenbetrieb die AFS-Konzentrationen beim Sandfilter im Mittel bei 3,7 mg/l und beim Trommelfilter im Mittel bei 2,5 mg/l und damit in einem guten und üblichen Bereich.

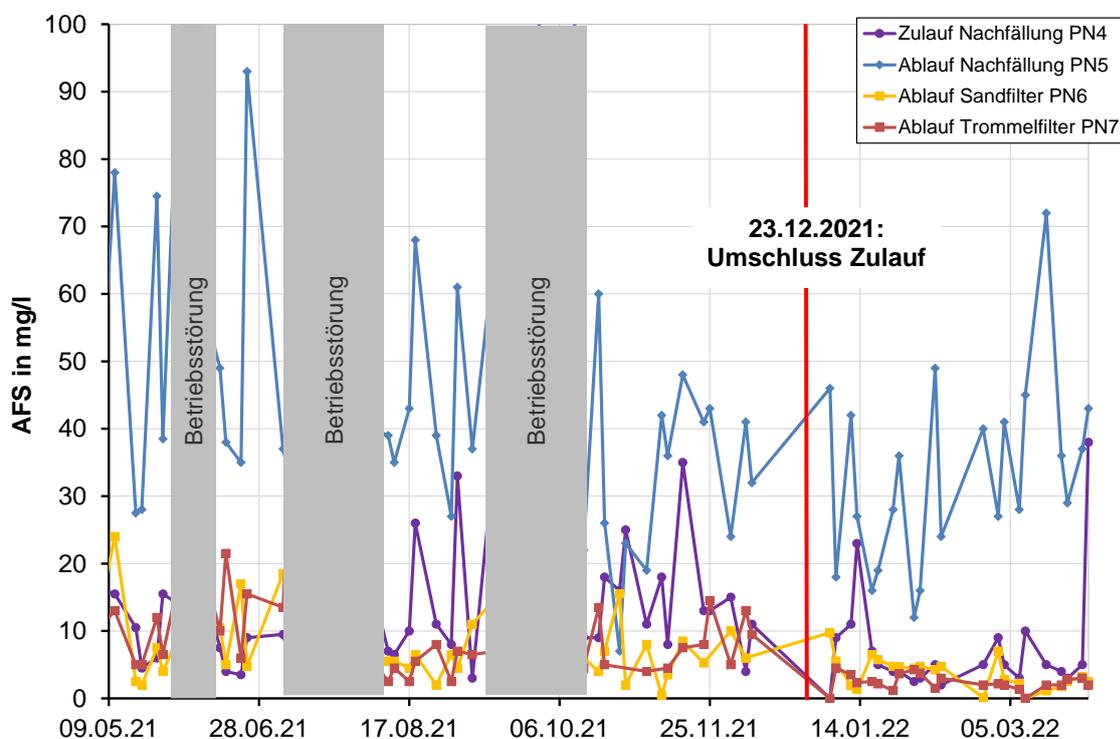


Abbildung 6-11: Abfiltrierbare Stoffe im Zulauf der Fällung, im Ablauf der Fällung und im Ablauf der Filteranlagen

6.2.4.2 Auswertung der Feststoffbelastung

Wesentliche Bemessungsgrößen für Filteranlagen sind die Filtergeschwindigkeit und die Feststoffbelastung. Bei dem untersuchten Verfahrenskonzept kommt der Feststoffbelastung eine besondere Bedeutung zu, da mit der ausschließlichen Nachfällung erhöhte Feststoffkonzentrationen bzw. -frachten abzuscheiden sind. Die Analysenergebnisse der abfiltrierbaren Stoffe wurden dargestellt. Im Folgenden wird die Feststoffbelastung der Filteranlagen ermittelt und bewertet.

Abbildung 6-12 zeigt die Feststoffflächenbelastung des Sandfilters bei den unterschiedlichen Versuchseinstellungen. Das DWA-Arbeitsblatt DWA-A 203 (2019) gibt für kontinuierlich betriebene Filter eine spezifische Feststoffflächenbelastung von 0,65 kg TS/(m² · h) bis 2 kg TS/(m² · h) als Bemessungsgröße an. Die vorliegenden Werte unterschreiten diesen Bereich bzw. liegen bei den Versuchen mit absichtlich erhöhter hydraulischer Belastung in diesem Bereich.

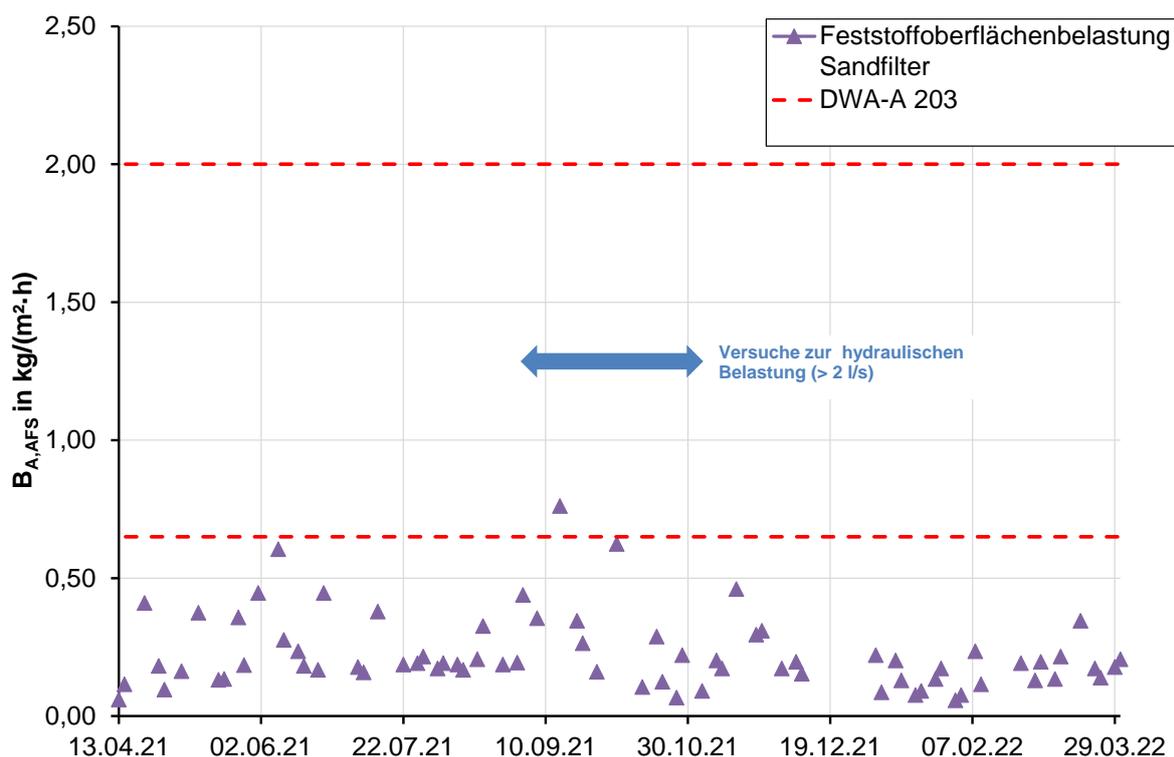


Abbildung 6-12: Feststoffbelastung des Sandfilters

Abbildung 6-13 zeigt die Feststoffflächenbelastung des Trommelfilters. Die Empfehlung des Herstellers (hier Fa. Mecana) liegt je nach eingesetztem Polstoff und zu erzielender Ablaufqualität bei 200 bis 400 g/(m² · h). Die Mehrheit der Werte unterschreitet den Wertebereich.

Nur einzelne Werte, insbesondere bei den Versuchen zur hydraulischen Belastung, liegen über dem Bereich.

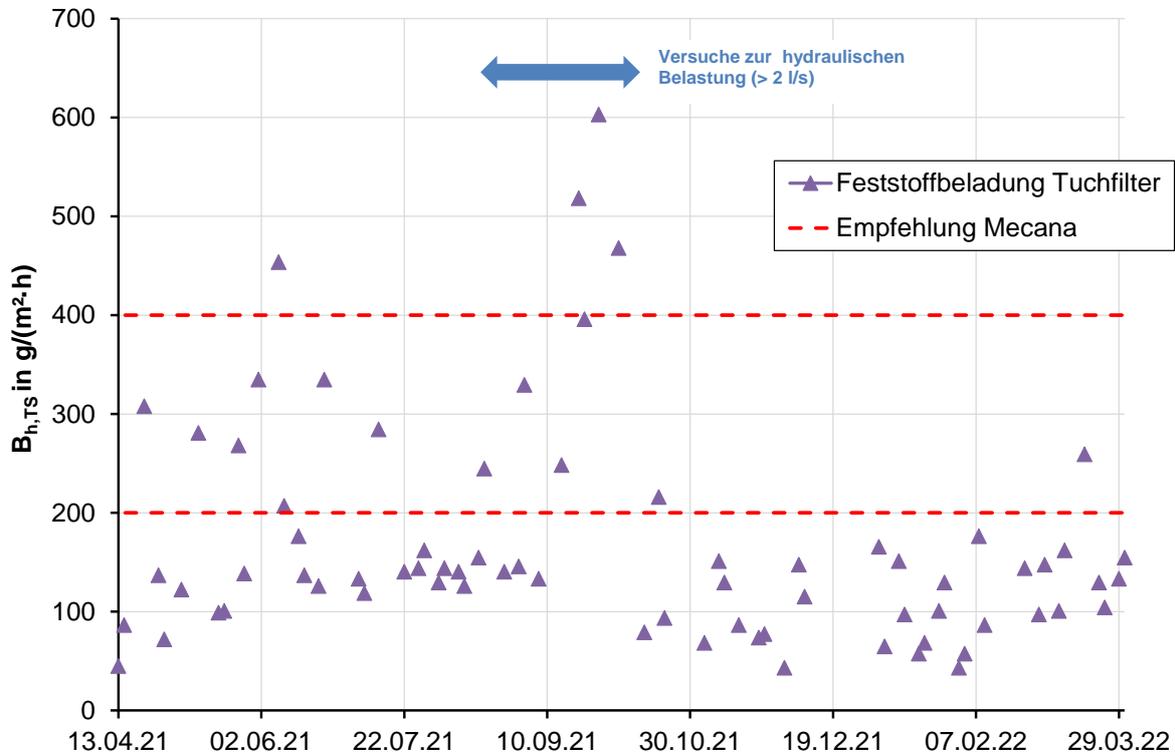


Abbildung 6-13: Feststoffbeladung des Trommelfilters

6.2.4.3 Variation der hydraulischen Beschickung der Filteranlagen

Im Rahmen des Versuchsbetriebes der Filteranlagen wurde die hydraulische Beschickung der Filteranlagen und damit die Filtergeschwindigkeit variiert. Im Zeitraum vom 20.08.2021 bis zum 04.10.2021 wurde eine höhere hydraulische Beschickung der Filteranlagen gemäß der in Abbildung 6-14 aufgeführten Werte erprobt.

Für den Sandfilter wurde die Zulaufmenge zwischen 2 l/s und 4,5 l/s variiert. Es wird eine maximale Filtergeschwindigkeit von 10,8 m/h erreicht. Ursprünglich geplante höhere Werte waren mit den zur Verfügung stehenden Pumpen und verbindenden Leitungen nicht möglich. Der Trommelfilter wurde mit 2 l/s bis 5 l/s beschickt, es resultiert eine maximale Filtergeschwindigkeit von 9 m/h.

Für Raumfilter als Flockungsfiltration wird eine maximale Filtergeschwindigkeit von ca. 15 m/h empfohlen. Die Herstellerempfehlung für den Trommelfilter liegt bei ca. 8 m/h.

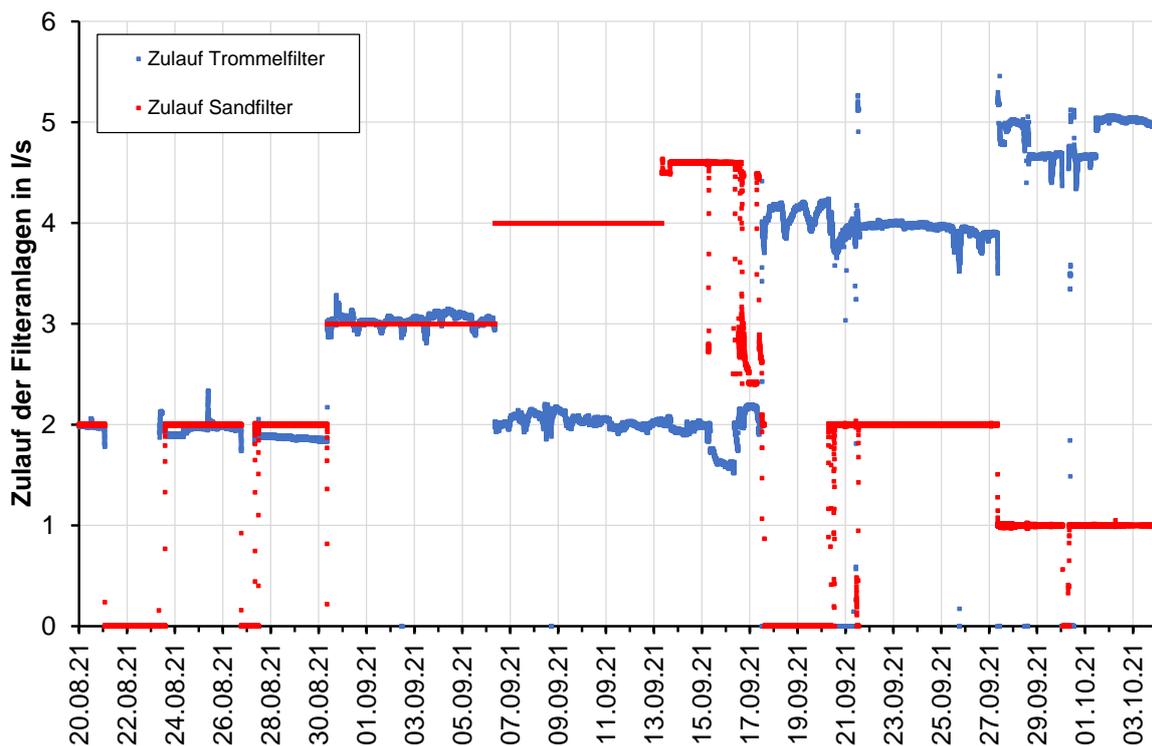


Abbildung 6-14: Hydraulische Beschickung der Filteranlagen im Versuchszeitraum

Tendenziell zeigt sich, bei erhöhter hydraulischer Belastung und Feststoffbelastung, eine Zunahme der AFS-Konzentration im Ablauf der Filteranlagen. Bei den Versuchen lag zeitweise jedoch auch ein deutlich erhöhter Feststoffabtrieb aus den Nachklärbecken vor (vgl. Abschnitt 6.2.4.1). Einzelne Konzentrationen der abfiltrierbaren Stoffe lagen an dieser Probenahmestelle über 20 mg/l. Ein eindeutiger, quantitativer Zusammenhang zwischen Filtergeschwindigkeit, Feststoffbelastung und Ablaufqualität der Filteranlagen über die bekannten Auslegungswerte hinaus kann deshalb nicht angegeben werden.

6.3 Versuche mit anaerober Stabilisierung

Wie in Kapitel 4.7 und 5.5 beschrieben, wurde der Versuchsaufbau zeitweise mit einem Faulbehälter erweitert. Abbildung 6-15 zeigt die Analysenwerte im Roh- und Faulschlamm. Aufgrund des Abbaus der Organik muss der Trockenrückstand im ausgefaulten Schlamm eigentlich unter dem Wert im Rohschlamm liegen, der Glühverlust (GV) ebenso. Da die Schlammcharakteristik insbesondere des Primärschlammes deutlichen Veränderungen unterliegt, die Beschickung manuell und diskontinuierlich erfolgt und Stichproben analysiert werden, ist dies nicht durchgehend der Fall. Ab Mitte Januar 2022 ergeben sich deutlich geringere Werte für den Glühverlust im ausgefaulten Schlamm, es wird ein besserer Abbau der Organik erreicht. Ursächlich kann die Schlammcharakteristik oder über die Zeit verbesserte Biozönose der

Faulung sein. Der oTR-Abbau, beschränkt auf die plausiblen Werte, liegt im Mittel bei ca. 35 %. Faulungsanlagen erreichen im Allgemeinen bis zu 50 % oTR-Abbau.

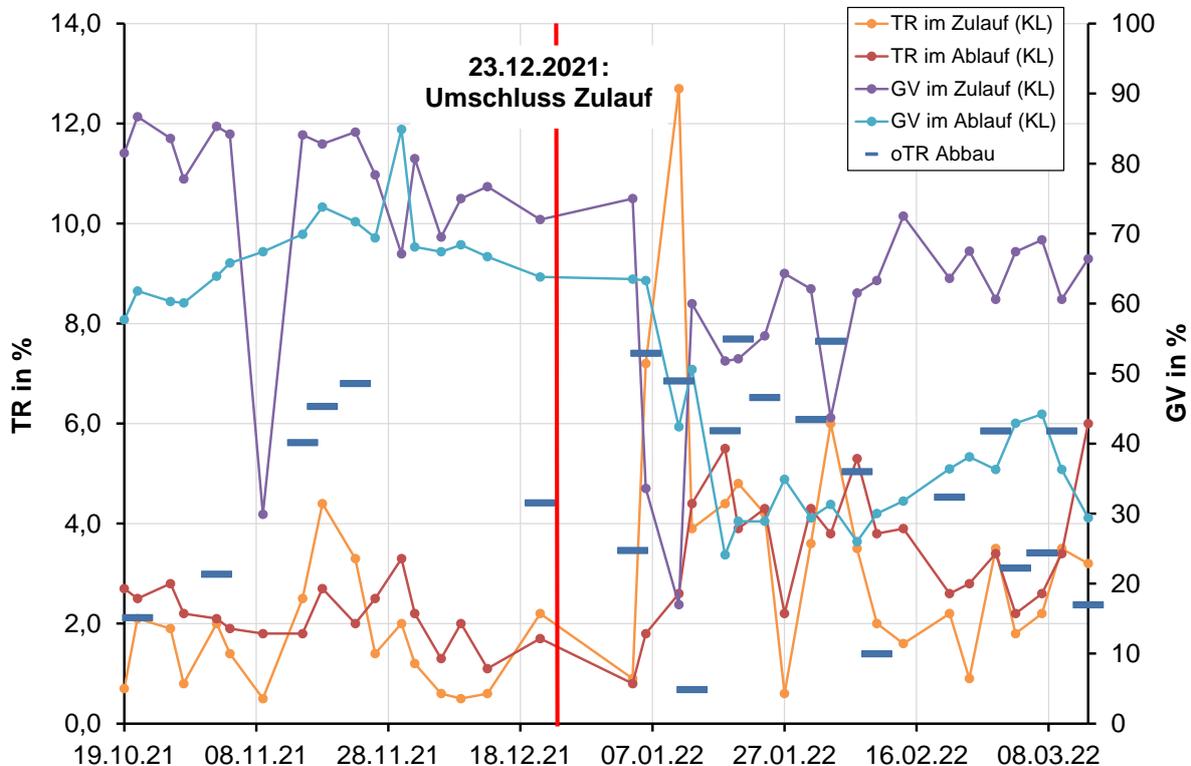


Abbildung 6-15: Trockenrückstand und Glühverlust im Rohschlamm und Faulschlamm

6.4 Phosphorbilanz

6.4.1 Theoretische P-Bilanz

Es wurde eine Feststoff- und P-Bilanz mit Bemessungswerten des DWA-A 131 (2016) für zwei mögliche Anlagenkonstellationen des P-Rec-Verfahrens mit Nachfällung aufgestellt.

Abbildung 6-16 zeigt die Ergebnisse als Sankey-Diagramm für eine aerob stabilisierende Anlage (ohne Bio-P). Es ergibt sich ein feststoffbezogener Phosphorgehalt im zu entsorgenden Schlamm von 15,3 g P / kg TR bzw. 1,53 %.

Abbildung 6-17 zeigt die Ergebnisse für eine Belebungsanlage mit Faulung (ohne Bio-P). Erwartungsgemäß ergibt sich ein vergleichbarer feststoffbezogener Phosphorgehalt im zu entsorgenden Schlamm von ca. 1,5 %. Mit Bezugnahme auf den Überschussschlamm ergibt sich ein feststoffbezogener Phosphorgehalt von $0,55 / 29 = 18,9$ g P / kg TR bzw. ca. 19 %.

Die einwohnerspezifischen Angaben des Feststoffs enthalten eine Ungenauigkeit durch Rundung von ca. 1g/(E·d) in der Bilanz.

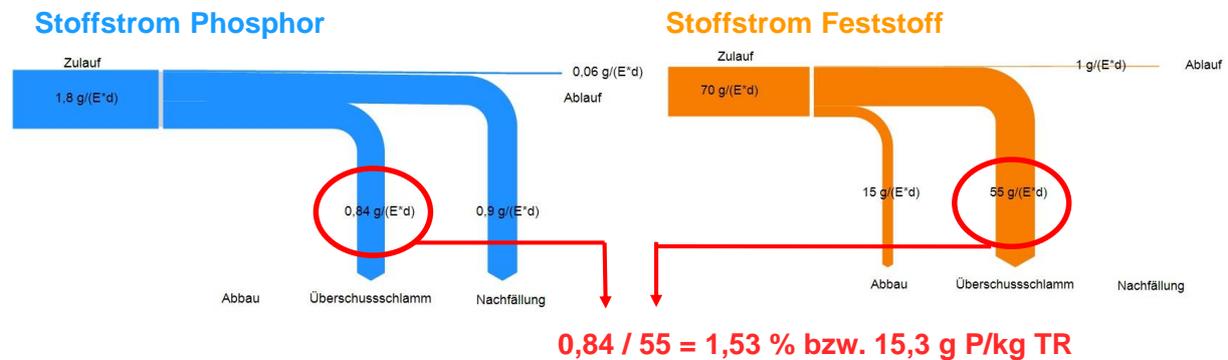


Abbildung 6-16: Feststoff- und P-Bilanz mit Standardwerten nach DWA-A 131 (2016) für aerob stabilisierende Anlage (ohne Bio-P) mit P-Rec

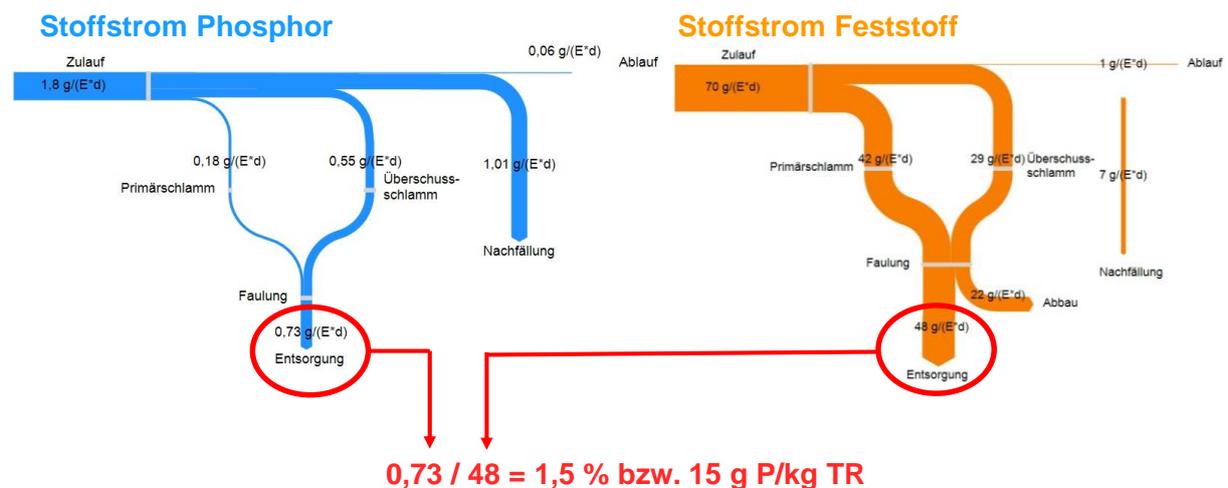


Abbildung 6-17: Feststoff- und P-Bilanz mit Standardwerten nach DWA-A 131 (2016) für eine Belebungsanlage mit Faulung (ohne Bio-P) mit P-Rec

6.4.2 P-Bilanz auf Basis der Analyseergebnisse

Abbildung 6-18 zeigt die Versuchsergebnisse zum feststoffbezogenen P-Gehalt in den untersuchten Stoffströmen.

Das jeweilige Spülwasser der Filteranlagen ist der gewonnene separate Stoffstrom zur Phosphorrückgewinnung. Es wird ein hoher Phosphorgehalt von i. M. 109 g P/kg TR erreicht.

Im Überschussschlamm liegen einzelne Werte des feststoffbezogenen Phosphorgehaltes um 20 g P/kg, i. M. liegen die Werte bei 33 g P/kg TR. Zu beachten ist die hohe P-Inkorporation auf dem Technikum trotz Außerbetriebnahme der vermehrten biologischen Phosphorelimination. Unter Umständen kommen anlagenspezifische Effekte zum Tragen. Die Vermeidung eines anaeroben Milieus als Voraussetzung für die vermehrte biologische P-Elimination wurde anhand der Messungen der Sauerstoff- und Nitratkonzentration überprüft.

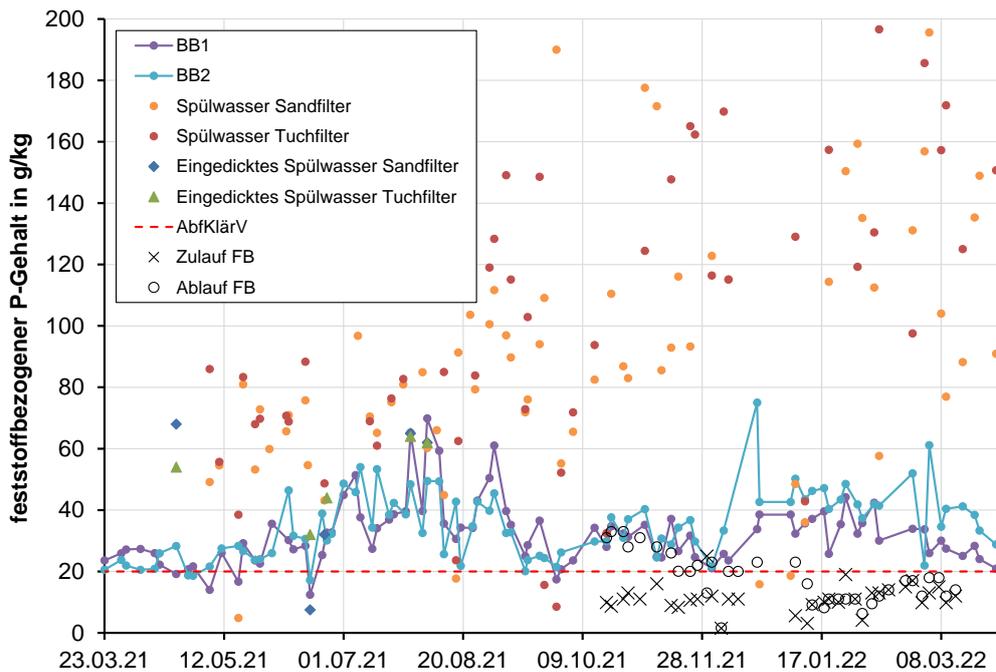


Abbildung 6-18: Versuchsergebnisse zum feststoffbezogenen P-Gehalt

Die Anlage wurde zeitweise um den Betrieb einer anaeroben Stabilisierung für einen Teilstrom ergänzt. Bis zur Umstellung des Zulaufs zeigt sich eine P-Rücklösung in der Faulung, die feststoffbezogenen P-Gehalte im Faulschlamm liegen meist über 20 g P/kg. Nach Umstellung des Zulaufs zeigt sich eine deutlich geringere P-Rücklösung in der Faulung, die Werte des feststoffbezogenen P-Gehaltes im Faulschlamm liegen unter 20 g P/kg. Die Umstellung des Zulaufs beinhaltet zum einen geringere Zulauffrachten. Zum anderen ist zu beachten, dass die Charakteristik des Primärschlammes einen wesentlichen Einfluss hat. Die Beschickung mit Primärschlamm erfolgte bei den Versuchen als manuelle chargenweise Beschickung.

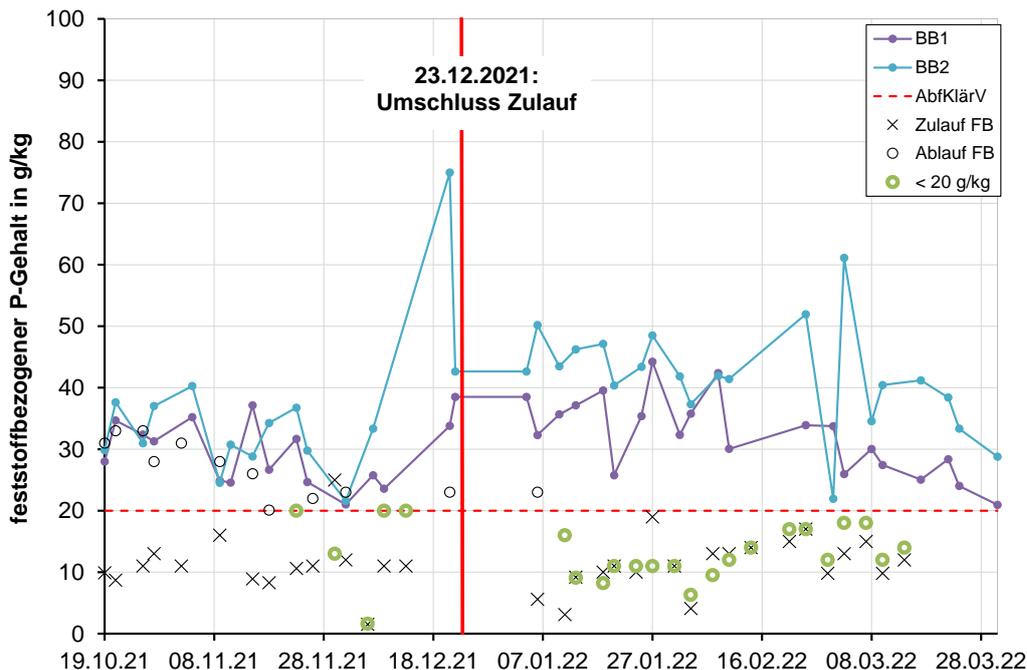


Abbildung 6-19: Versuchsergebnisse zum feststoffbezogenen P-Gehalt inkl. Erweiterung um eine Faulung

6.5 Bewertung der erzielten Ergebnisse im Vergleich zu den Anforderungen der AbfklärV

Die theoretische P-Bilanz mit Bemessungswerten des DWA-A 131 (2016) zeigt mit den Phosphorgehalt von ca. 15 g P/kg TS bzw. 1,5 % im zu entsorgenden Schlamm für die Anlagenkonstellationen aerob oder anaerob stabilisierende Belebungsanlage ohne vermehrte biologische P-Elimination mit P-Rec-Verfahren eine deutliche Unterschreitung des Wertes von 2 %, ab der die Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung greift.

Im Fall einer vermehrten biologischen P-Elimination ergibt sich der Phosphorgehalt im zu entsorgenden Schlamm für eine anaerob stabilisierende Belebungsanlage rechnerisch zu ca. 20 g P/kg TS bzw. 19,95 %. Zur gesicherten Unterschreitung kann in diesem Fall das P-Rec-Verfahren zusätzlich z. B. mit einer P-Abscheidung im Schlamm / Schlammwasser ergänzt werden.

Bei den erzielten Versuchsergebnissen wird im Überschussschlamm der Wert von 20 g P/kg, nicht unterschritten. Bei Ergänzung der Anlage um den Betrieb einer anaeroben Stabilisierung für einen Teilstrom werden nach Umstellung des Zulaufs bei einem insgesamt stabileren Anlagenbetrieb Werte unterhalb von 20 g P/kg im Faulschlamm bzw. zu entsorgenden Schlamm erreicht. Weitere Untersuchungen auf einer Anlage inkl. Vorklärung und Faulung mit Analysen im Roh- und Faulschlamm sind zu empfehlen.

6.6 Aufkonzentrierung des Fällschlammes

Zur Aufkonzentrierung des Fällschlammes bzw. Spülwassers der Filteranlagen wurden Untersuchungen mit einem Dekanter durchgeführt (Alfa Laval Aldec 10).

Eingangs erfolgten Probeläufe zur Optimierung der Drehzahl, des Volumenstroms zur Aufkonzentrierung und des Schlammanfalls- und der -entnahme.

In Abbildung 6-20 sind die nachfolgenden Analysenergebnisse für die Trockenrückstände des Spülwassers im Zulauf zum Dekanter und im Austrag des Dekanters bei den Versuchen mit und ohne Einsatz von polymerem Flockungsmittel dargestellt. Im Spülwasser liegt eine geringe Feststoffkonzentration, gemessen als AFS, von i. M. ca. 300 mg/l vor. Mit dem Dekanter kann ohne Einsatz von Flockungsmittel eine Aufkonzentrierung auf einen Feststoffgehalt, gemessen als TR, von 10 bis 18 %, i. M. 14 % erreicht werden. Es wurde eine stichfeste Konsistenz erreicht.

Bei den Versuchen mit Zugabe eines polymeren Flockungsmittels kam eine 0,1%ige Gebrauchslösung des Flockungsmittels Praestol™ K 332 der Fa. Solenis (Datenblatt in Anlage 3) zum Einsatz. Mit der Zugabe des Flockungsmittels wurde im Austrag des Dekanters ein Feststoffgehalt von 20 bis 32 %, i. M. 25,8 % erreicht. Der Schlammaustrag des Dekanters veränderte sich von einer stichfesten Konsistenz hin zu einer festen krümeligen Konsistenz.

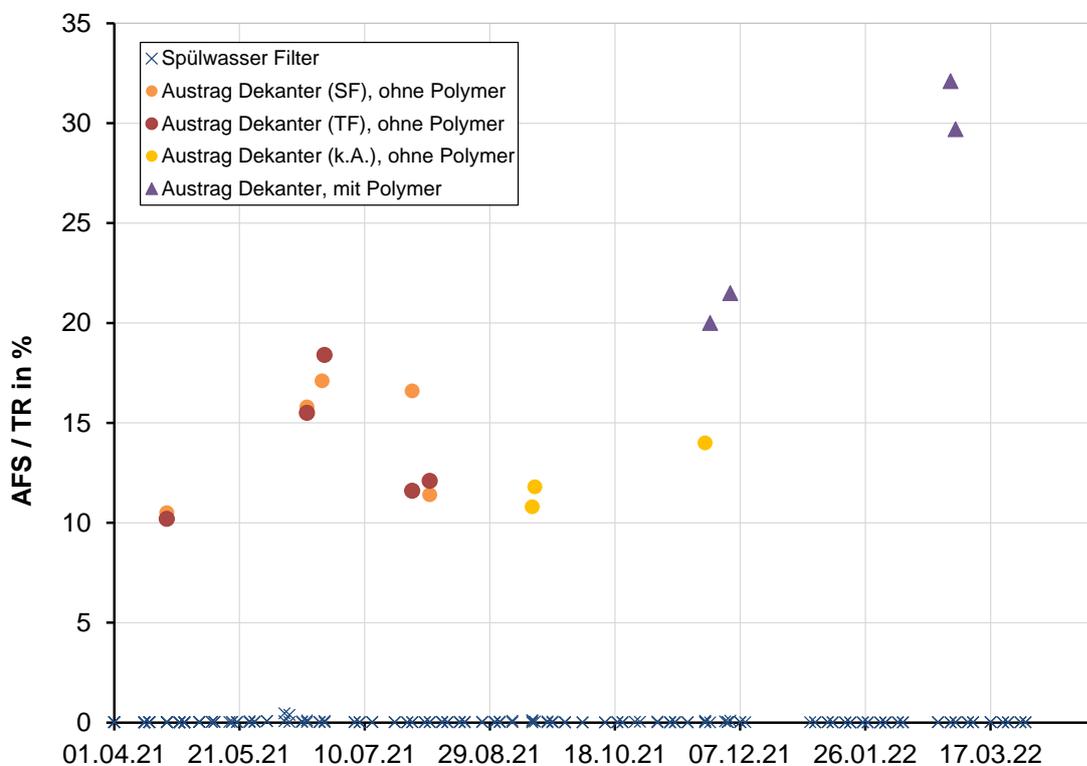


Abbildung 6-20: Feststoffgehalt im Zulauf und Austrag des Dekanters bei den Versuchen zur Aufkonzentrierung

7 Untersuchung der Verwertungspotentiale des gewonnenen Stoffstroms

7.1 Versuche zur Pflanzenverfügbarkeit

Im Rahmen des Projekts werden die Verwertungspotentiale des P-angereicherten Fällschlammes aus der Nachbehandlungsstufe gezielt unter dem Gesichtspunkt der Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Phosphats und der enthaltenen Begleitstoffe (Schadstoffparameter) untersucht. Es waren dabei sowohl der Einfluss des Fällmittels (Eisen (Fe) vs. Aluminium (Al)) als auch der Pflanzenart auf die P-Verfügbarkeit zu untersuchen und anschließend die von den Partnern zur Verfügung gestellten Schlämme in standardisierten Pflanzenversuchen zu testen.

7.1.1 Versuchsdurchführung

Die Charakterisierung der Pflanzenverfügbarkeit wird in standardisierten Pflanzenversuchen mit einem bodenähnlichen, besonders P-armen Substrat durchgeführt, wobei verschiedene Pflanzenarten mit unterschiedlichem Aneignungsvermögen verwendet werden:

- Welsches Weidelgras (*Lolium multiflorum*)
- Luzerne (*Medicago sativa*)
- Mais (*Zea mays*)
- Raps (*Brassica napus*)

Im Hauptversuch 2, 2022, wurde auf die Verwendung von Luzerne verzichtet. Auf den Einsatz wurde zum einen verzichtet, um den Versuchsumfang in Grenzen zu halten, zum anderen konnte durch die Verwendung von Weidelgras, Mais und Raps bereits das Spektrum an Pflanzenverfügbarkeiten weitestgehend abgedeckt werden.

Die Prüfung neuer Fällschlämme wurde in Gefäßversuchen nach Kick-Brauckmann mit einem standardisierbaren mineralischen Substrat (10 L/Versuchsgefäß) durchgeführt. Versuchspflanzen waren dabei Welsches Weidelgras, Sorte *AstonEnergy* in 4 Schnitten sowie zusätzlich Mais, Sorte *Milkstar* als P-ineffiziente Kultur. Die P-Düngestufe war 40 mg P/kg Substrat (entspr. 120 kg P/ha), n = 4. Die Beerntungen bei Weidelgras wurden ca. alle 4 Wochen durchgeführt. Auf Grund der Verfügbarkeit von Testprodukten konnte der Start des Experiments erst im Herbst 2021 im Gewächshaus bei geringerer Lichtintensität und moderaten Temperaturen stattfinden. In umfangreichen Versuchen hat HGoTECH im Rahmen des BMBF RePhoR - Koordinierungsprojekt „TransPhoR“ jedoch gezeigt, dass die Jahreszeit für die Reihenfolge der Bewertung bei Vergleich verschiedener Produkte keinen Einfluss hat, wenn extreme Bedingungen vermieden werden.

Tabelle 7-1 zeigt die im Rahmen des Versuchs eingesetzten Produkte, nachfolgend die Kurzbezeichnungen:

1. Kontrolle ohne P
2. TSP(Triplesuperphosphat)
3. Aluminium 0,1 (Al 0,1)
4. Aluminium 0,3 (Al 0,3)
5. Aluminium 0,7 Rückspülschlamm (Al 0,7)
6. Aluminium Mischprobe
7. Eisen 0,1 (Fe 0,1)
8. Eisen 0,3 (Fe 0,3)
9. Eisen 0,7 Rückspülschlamm (Fe 0,7)

Tabelle 7-1: Versuchslog Hauptversuch 1

Datum	Tätigkeitsbeschreibung
21.10.2021	Aussaat Hauptversuch
29.10.2021	Nachsaat Weidelgras
23.11.2021	1. Ernte Weidelgras + Fotos
25.11.2021	KNO ₃ -Düngung Weidelgras
17.12.2021	2. Ernte Weidelgras + Fotos
04.01.2022	Ernte Mais + KNO ₃ Düngung (Weidelgras) + Fotos
21.01.2022	3. Ernte Weidelgras + Fotos
22.02.2022	4. Ernte Weidelgras + Bodenproben

7.1.2 Hauptversuch 1

7.1.2.1 Versuche mit Weidelgras

Abbildung 7-1 zeigt die Trockenmassen des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgras nach Düngung mit verschiedenen P-Düngern, Abbildung 7-2 zeigt die P-Entzüge des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses. Dargestellt sind bei den nachfolgenden Abbildungen zur Trockenmasse und den P-Entzügen jeweils die Mittelwerte und Standardabweichungen ($n = 4$). Die dargestellten Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung. Werte desselben Erntetermins mit gleichen Kleinbuchstaben oder Gesamtmassen mit dem gleichen Großbuchstaben sind nicht signifikant verschieden (Duncan-Test, $\alpha = 0,05$).

Abbildung 7-3 zeigt beispielhaft den Aufwuchs an Weidelgras vor dem vierten und letzten Schnitt nach Düngung mit verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Goldstandard TSP.

Durch die Bedingungen im Winter sind die Biomasseerträge geringer und die Gesamtbio-massebildung nicht signifikant verschieden (Abbildung 7-1), allerdings zeigen sich signifikante Unterschiede besonders zum ersten Erntetermin. Hier zeigen die P-Entzüge sehr deutliche und signifikante Unterschiede in der P-Verfügbarkeit auf (Abbildung 7-2). Es wird deutlich, dass die mit Al gefällten Schlämme eine deutlich höhere P-Verfügbarkeit besitzen als die Fe-Schlämme, dies insbesondere was die P-Nachlieferung für die Schnitte 3 und 4 angeht (s. a. Abbildung 7-3).

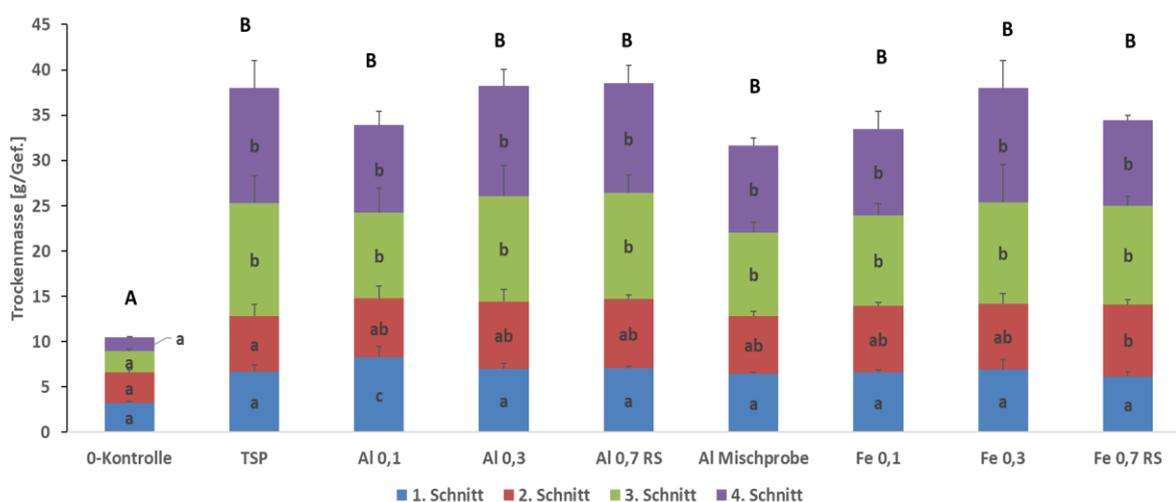


Abbildung 7-1: Trockenmassen des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgras nach Düngung mit verschiedenen P-Düngern

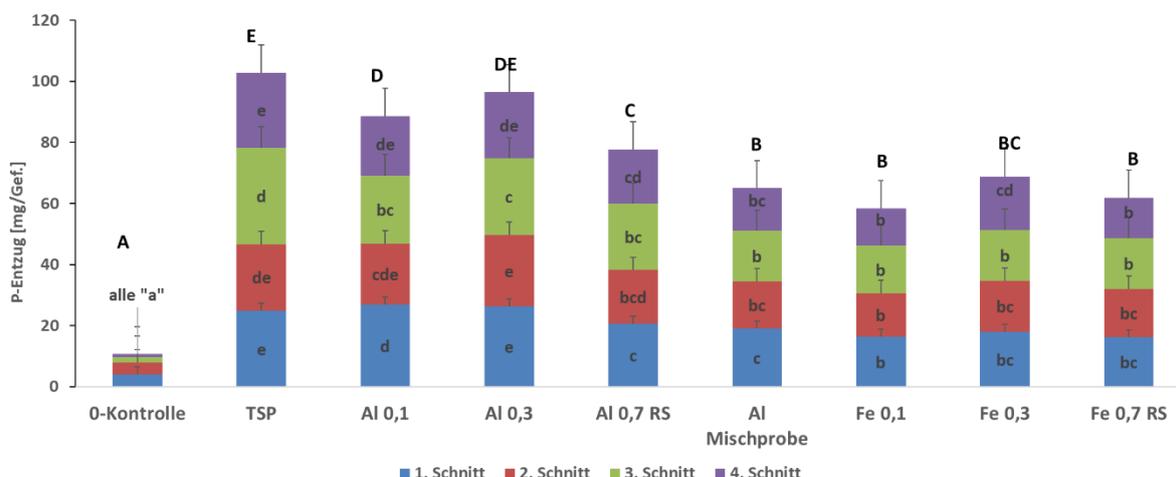


Abbildung 7-2: P-Entzüge des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgras nach Düngung mit verschiedenen P-Düngern



Abbildung 7-3: Aufwuchs an Weidelgras vor dem vierten und letzten Schnitt nach Düngung mit verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Goldstandard TSP

Zusätzlich wurden am Versuchsende noch Proben des Substrats, nach der VDLUFA-Standardmethode, auf das CAL-mobilisierbare P untersucht (Abbildung 7-4). Diese Methode ist im deutschsprachigen Raum die am weitesten verbreitete Methode zur Ermittlung des Versorgungszustandes von Böden. In Abbildung 7-4 wurden die Werte des CAL-extrahierbaren P (blau) und der Pflanzenentzug (rot) aufsummiert. Demnach sind in allen Behandlungen noch erhebliche Restmengen am P im Substrat verblieben, selbst in der ungedüngten Kontrolle. Allerdings ist den Ergebnissen auch zu entnehmen, dass die Korrelation zwischen Pflanzenverfügbarkeit und CAL – extrahierbarem P gering ist. Dabei ist festzuhalten, dass die CAL - Extraktion in erster Linie nur eine grobe Einteilung von P und K (Kalium) Verfügbarkeiten erlaubt. Der eigentliche Wert der Methode liegt darin, für den einzelnen Standort die Entwicklung der Versorgungsstufen und damit von Düngungsmaßnahmen über die Zeit verfolgen zu können. Die Methode kann keine direkte Information darüber liefern, wieviel P z. B. jährlich zur Verfügung steht, sondern ist als eine Maßzahl zu sehen.

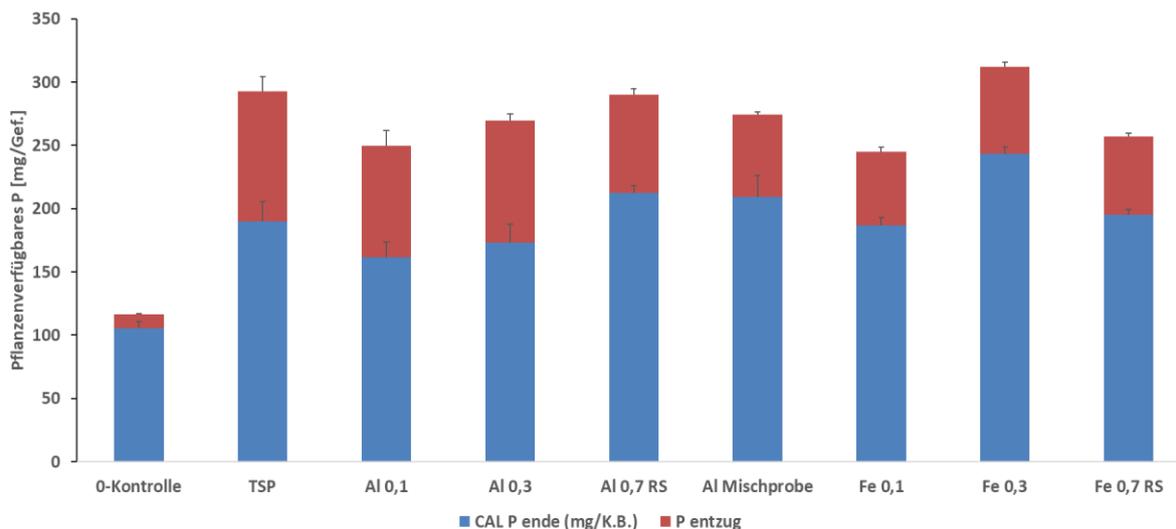


Abbildung 7-4: Summe aus initialen CAL-P Gehalten im Substrat und die von Weidelgras aus 4 Schnitten aufsummierte aufgenommene P-Menge nach Düngung mit verschiedenen P-Düngern (Mittelwerte und Standardabweichungen, n = 4)

7.1.2.2 Versuche mit Mais

Das geringe P-Aneignungsvermögen von Mais führt in diesem Versuch zu wesentlich größeren Unterschieden in der Biomassebildung, wobei die Fe-Schlämme sowie der Rückspülschlamm von der Nullkontrolle nicht verschieden sind und kaum Wachstum gezeigt hatten (Abbildung 7-5.). Die beiden Al-Schlämme schneiden signifikant besser ab, allerdings im Vergleich zu TSP immer noch mit einer geringen Verfügbarkeit. Dass das Wachstum eindeutig P-limitiert war, zeigen auch die Gesamt-P-Entzüge (Abbildung 7-6).

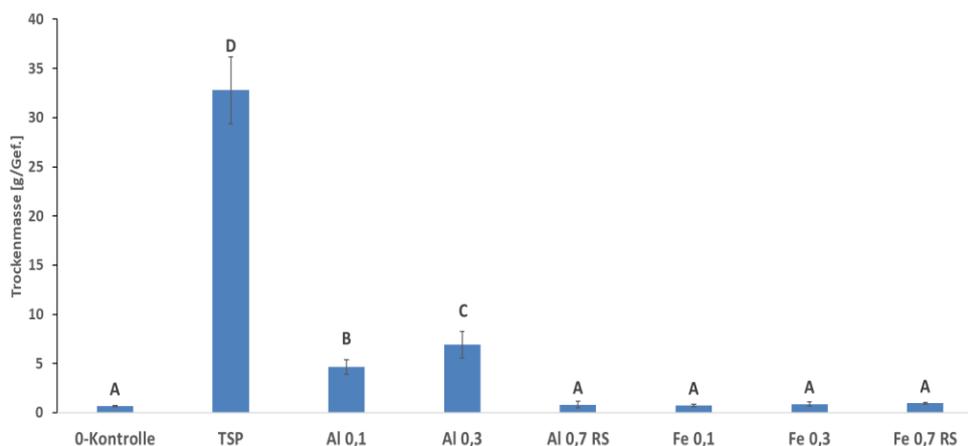


Abbildung 7-5: Trockenmassen des geernteten Aufwuchses von Mais nach Düngung mit verschiedenen P-Rezyklaten

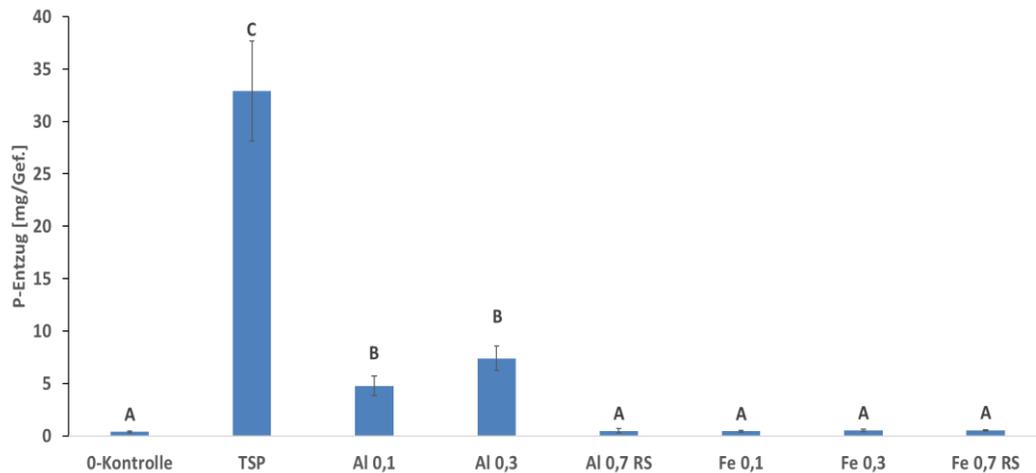


Abbildung 7-6: P-Entzüge des geernteten Aufwuchses von Mais nach Düngung mit verschiedenen P-Rezyklaten

Da die P-Entzüge durch Mais so gering waren, wird hier auf die Darstellung der CAL-Werte plus P-Entzüge zu Versuchsende verzichtet.

7.1.3 Hauptversuch 2

Im Jahr 2022 wurde eine neue Versuchsserie angelegt, in der ein nach den Analysenparametern günstiger Rückspülschlamm (s. Probe AgroLab ID AL1 in Anlage 4) eingesetzt und mit den üblichen Kontrollen sowie einem teilaufgeschlossenen Rezyklat aus thermischer Behandlung verglichen wurde. Die Versuchsanlage war ansonsten identisch zum Hauptversuch 1.

7.1.3.1 Versuche mit Weidelgras

Es zeigte sich, dass die P-Verfügbarkeit des Recyclingschlammes der eines voll wasserlöslichen P – Düngers wie TSP gleich ist, sowohl was die Ertragswirksamkeit (Abbildung 7-7) als auch die P-Entzüge (Abbildung 7-8) angeht. Das teilaufgeschlossene Rezyklat weist zwar für ein thermisches Phosphat eine recht gute Verfügbarkeit auf, allerdings ist die kurzfristige Wirkung doch deutlich geringer als die des Rückspülschlammes und von TSP.

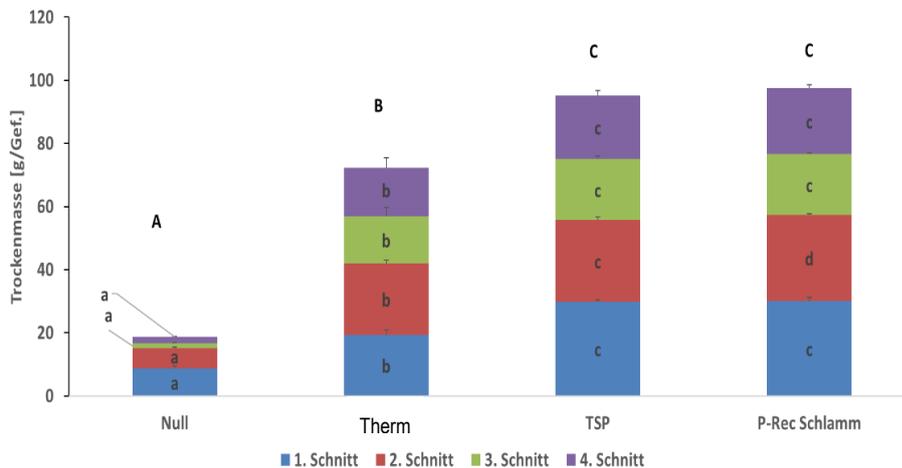


Abbildung 7-7: Trockenmassen des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgrass nach Düngung mit 2 verschiedenen P-Rezyklaten (Therm = Versuchsprodukt thermisch mit Teilaufschluss)

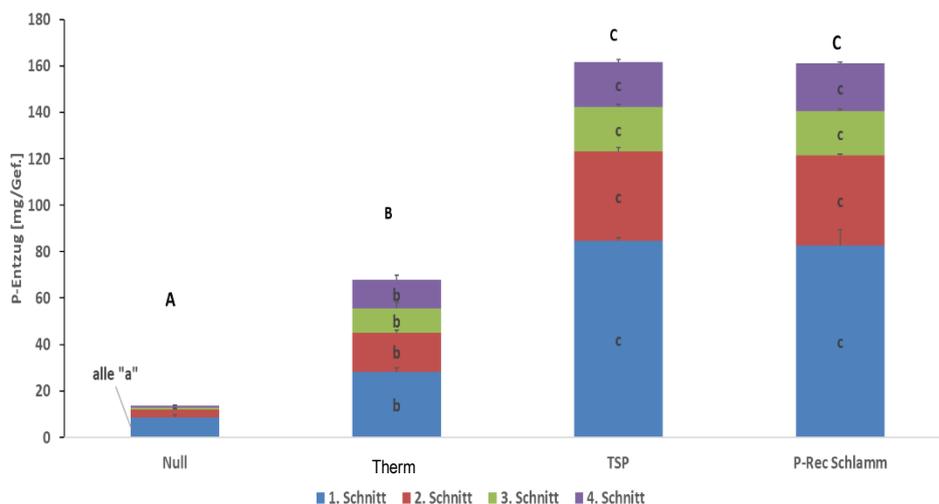


Abbildung 7-8: P-Entzüge des in vier Schnitten geernteten Aufwuchses von Weidelgrass nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten

7.1.3.2 Versuche mit Mais

Für Mais mit geringem P-Aneignungsvermögen sind die Ergebnisse hinsichtlich des thermisch aufgeschlossenen P deutlich schlechter, während die Ertragsleistung des mit dem Schlamm gedüngten Mais vergleichsweise wenig unter dem von TSP liegt (Abbildung 7-9). Wie in Abbildung 7-10 zu erkennen, sind die unterschiedlichen Verfügbarkeiten auch in den stark verschiedenen Entzügen zu sehen.

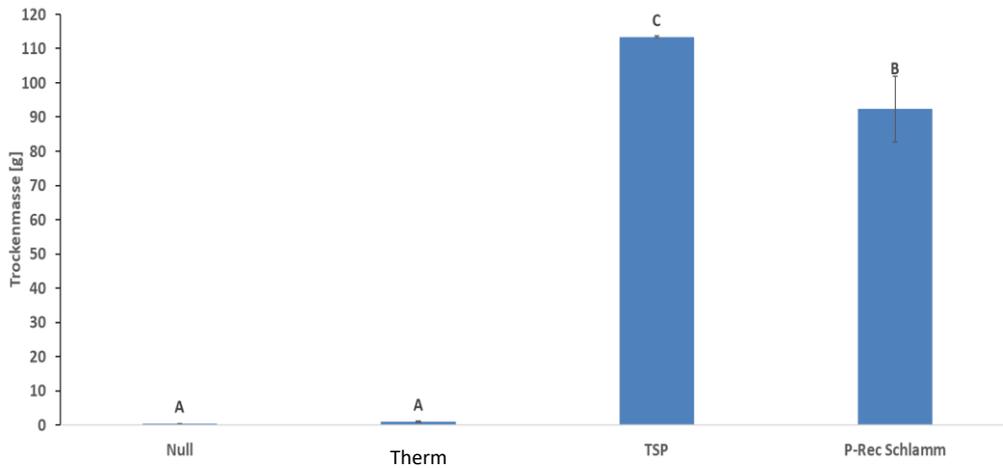


Abbildung 7-9: Trockenmassen des geernteten Aufwuchses von Mais nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten

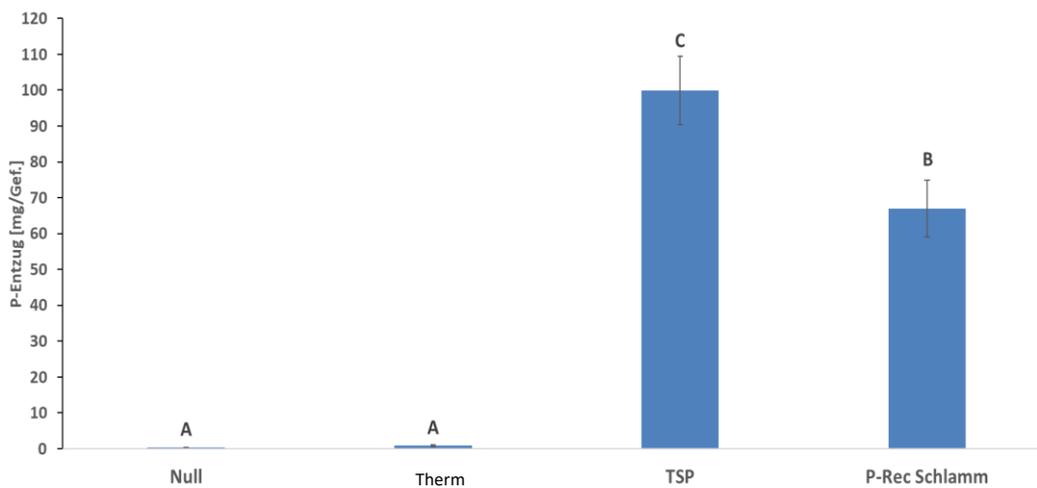


Abbildung 7-10: P-Entzüge des geernteten Aufwuchses von Mais nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten

Da die P-Entzüge durch Mais in der Nullkontrolle und beim thermisch aufgeschlossenen P so gering waren, wird hier auf die Darstellung der CAL-Werte plus P-Entzüge zu Versuchsende verzichtet. Abbildung 7-11 zeigt sehr deutlich die völlig unterschiedliche Entwicklung von Mais mit den beiden P-Rezyklaten.



Abbildung 7-11: Wachstum von Mais nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Standard TSP

7.1.3.3 Versuche mit Raps

Raps kann das Phosphat aus den Rezyklaten sehr gut verwerten und zeigt dies entsprechend durch eine hohe Biomassebildung (Abbildung 7-12), selbst bei dem thermischen Rezyklat. Die Ertragsleistung beim Schlamm-Rezyklat war sogar signifikant höher als beim Goldstandard TSP.

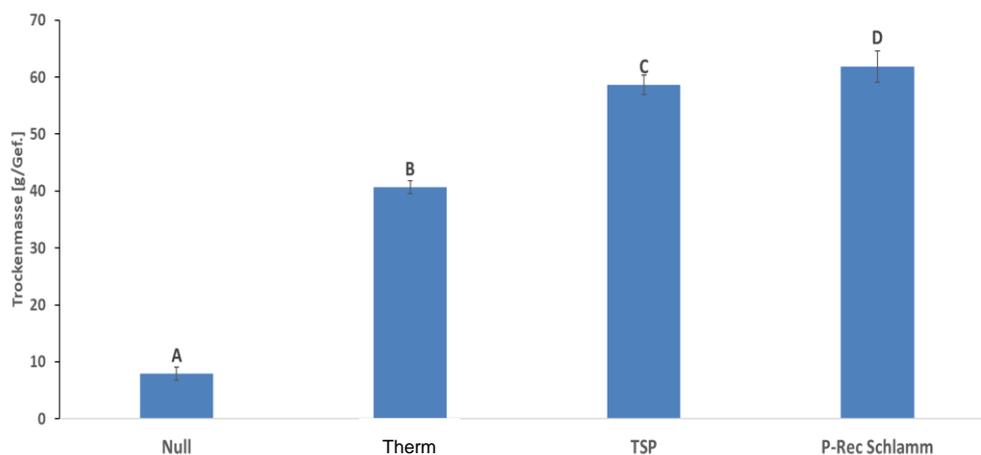


Abbildung 7-12: Biomassebildung von Raps nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Standard TSP

Die signifikant höhere Biomassebildung beim Raps könnte sogar daher rühren, dass das anfänglich hohe P-Angebot bei TSP für Raps bereits zu hoch ist (Abbildung 7-12) und zu sekundären Problemen wie z. B. einer induzierten Zn-Unterversorgung geführt hat. Die P-Versorgung aus dem Schlamm-Rezyklat wäre dann dem Bedarf von Raps mit dem hohen Aufnahmevermögen besser angepasst (Abbildung 7-12). Dies lässt sich auch durch den deutlich stärkeren Blütenansatz der Schlamm-Variante erkennen (s. Abbildung 7-14). Zwar könnte der Schlamm mehr Spurenelemente beigetragen haben, allerdings waren allen Behandlungen Spurenelemente in ausreichender Menge zugegeben.

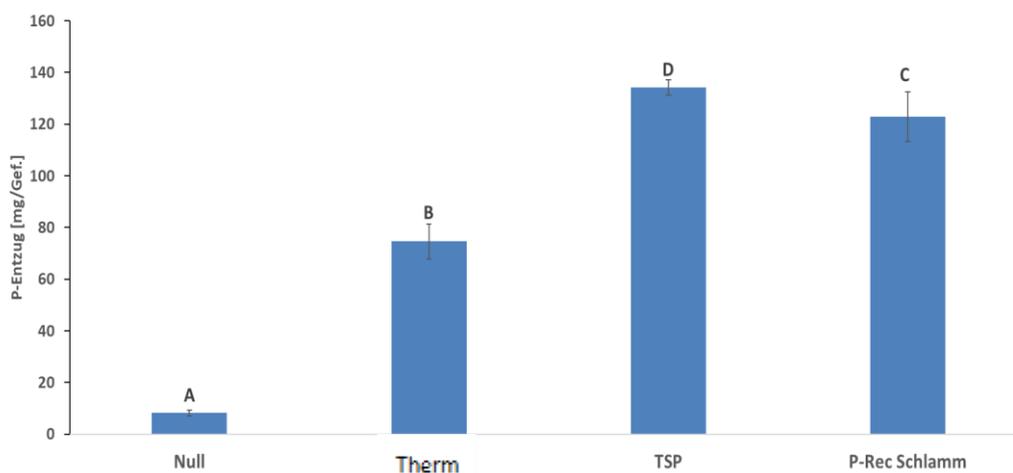


Abbildung 7-13: P-Entzüge von Raps nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Standard TSP



Abbildung 7-14: Wachstum von Raps nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten im Vergleich zur Nullkontrolle und dem Standard TSP mit deutlichen Unterschieden in der Blütenbildung

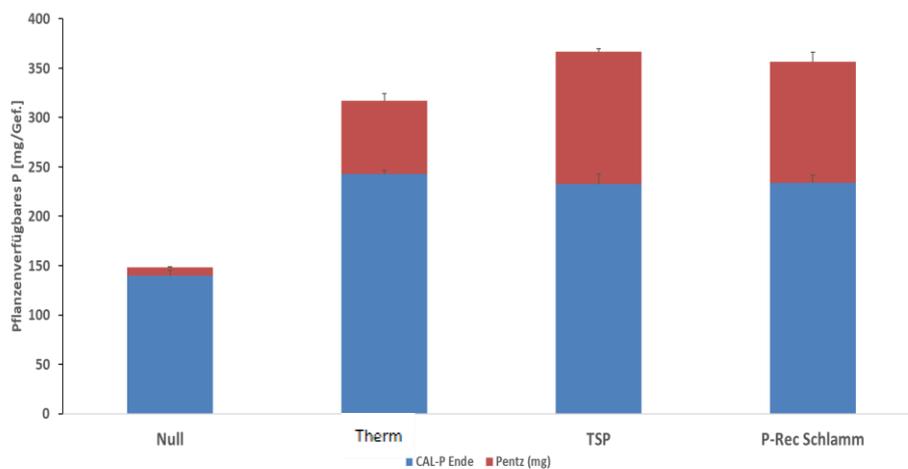


Abbildung 7-15: Summe aus initialen CAL-P Gehalten im Substrat und die von Raps aufgenommene P-Menge nach Düngung mit zwei verschiedenen P-Rezyklaten (Mittelwerte und Standardabweichungen, n = 4)

7.1.4 Zusammenfassung

Es ist festzuhalten, dass zwischen Pflanzenarten erhebliche Unterschiede in der P-Aufnahmeeffizienz bestehen, die Pflanzenverfügbarkeit somit also ein relativer Begriff ist.

Von allen getesteten Schlämmen war der im Hauptversuch 2 eingesetzte Schlamm mit Einsatz von Aluminiumsulfat als Fällmittel (Bezeichnung AL1) am wirksamsten und hat selbst bei dem wenig P effizienten Mais zu einem hohen Ertrag geführt und eine dem Goldstandard TSP mindestens ebenbürtigen Wuchsleistung gezeigt. Generell hatten die mit Aluminiumsalz gefällten Schlämme etwas besser im Weidelgras-Test abgeschnitten als die mit Eisensalz gefällten Schlämme. Die Versuche haben auch sehr deutlich gezeigt, dass ein thermisch aufgeschlossenes P gegenüber dem Fällschlamm besonders bei weniger effizienten Pflanzenarten eine deutlich geringere P-Wirkung zeigt.

Unter der Vorgabe, dass im Klärprozess ausgefälltes Phosphat düngerwirksam sein sollte, ist der Al-Fällung mit einem möglichst geringen Überschuss an Fällmittel eindeutig der Vorzug gegenüber der Fe-Fällung zu geben.

7.2 Bewertung des Produktes nach Düngemittelverordnung und weiteren rechtlichen Vorgaben

Die Bewertung der P-Rezyklate nach DüMV (2012) und AbfKlärV (2017) ist den durch AgroLab durchgeführten Analysen zu entnehmen (s. a. Anlage 4).

P-Wirkung

In Tabelle 7-2 werden die gebräuchlichen Analysen zur Bewertung von P-Düngemitteln aufgezeigt. Hier liegen für das P_{ges} sowohl Analysen der HGoTECH als auch von AgroLab vor, gekennzeichnet mit *. Wo diese voneinander etwas abweichen, sind beide Werte aufgeführt. Die Wasserlöslichkeit liegt in allen Fällen an oder unter der Nachweisgrenze und ist daher hier nicht aufgeführt. Die vorgestellten Pflanzenversuche in Kapitel 7.1 zeigten dabei, dass Wasserlöslichkeit kein geeignetes Maß für die P-Verfügbarkeit sein kann.

Tabelle 7-2: P-Gehalte, gesamt, citrat- und neutralammoncitrat-lösliche Anteile und N_{ges} -Gehalt

Originalbeschriftung	Agrolab ID	P_{gesamt} TECH /Agrolab*	HGo-	$P_{citronensäure}$ HGoTECH	P_{nac} HGo-TECH	N% HGoTECH
Nachlieferung „Austrag Dekanter KW9 2022“ Info: Fällung mit $AlSO_4$ und Einsatz von Polymeren	AL1	9,08 / *8,95		2,88	9,10	2,83

Originalbeschriftung	Agrolab ID	P _{gesamt} TECH /Agrolab*	HGo-	P _{citronensäure} HGoTECH	P _{nac} HGo-TECH	N% HGoTECH
Mischprobe Sand und Trommelfilter Aluminium 0,7 mg/l, 14.07.21	AL2	*4,67		0,68	4,60	1,77
Aufkonzentrierter Schlamm Aluminium 0,3 mg/l, 29.07.21	AL3	5,84 / *5,85		1,65	5,92	2,26
Aufkonzentrierter Schlamm Aluminium 0,1 mg/l, 19.08.21	AL4	6,95		0,87	6,91	1,67
Angereicherter Schlamm 0,1 mg/l Fe Ohne Datum	AL5	*4,23		0,23	4,38	1,27
Angereicherter Schlamm 0,7 mg/l Eisen 20.05.21	AL6	4,86 / *5,19		1,65	4,94	3,09
Angereicherter Schlamm 0,3 mg/l Eisen 17.06.21	AL7	*5,54		1,06	5,37	1,63
Eingedickter Rückspülschlamm Trommelfilter + Sandfilter Austrag Dekanter 0,7 mg/l ohne zusätzl. Phosphorsäuredosierung, KW16 2021	AL8	*4,97		1,70	4,87	1,34

Das Rezyklat mit der Kennung AL1, welches auch im Hauptversuch 2 verwendet wurde, weist einen durchaus guten Gesamtgehalt an P auf, der vollständig Neutralammonicitrat (nac) löslich ist (Tabelle 7-2). Dagegen liegt die Citratlöslichkeit deutlich darunter. Nach den hier vorgestellten Versuchsergebnissen kommt also die Bewertung der Düngewirkung als P_{nac} der Wirksamkeit im Pflanzenversuch am nächsten.

Die im Hauptversuch 1 durchgeführten Pflanzentests der Produkte AL2 – AL8 ergaben im Durchschnitt geringe P-Wirkungen, wobei auch der P-Gehalt im Produkt deutlich geringer war. Dabei wurde P entweder in weniger gut verfügbaren Formen gefällt und/oder es gab einen größeren Überschuss an Fällmittel, welcher die P-Verfügbarkeit ebenso einschränkt.

Für die Düngerbemessung im Betrieb ist weiterhin zu beachten, dass der Schlamm auch N beisteuert, der für die Bilanzierung mit anzurechnen ist. Da aus organischem Düngemittel stammend, ist vom Landwirt die Höchstgrenze für die Düngung mit N aus organischem Dünger zu beachten (derzeit max. 170 kg N/ha).

Schwermetallgehalte

Generell sind die Schwermetallgehalte gemäß den Analysen von AgroLab (Anlage 4) als unkritisch und unter den Grenzwerten liegend einzuordnen. Allerdings ist bei den Rezyklaten AL2 – AL8 die Konzentration an Ni (Nickel) weiter über dem zulässigen Grenzwert und auch im Verhältnis zu den anderen Schwermetallgehalten als ungewöhnlich hoch anzusehen. Diese

Werte lassen sich eigentlich nicht mit einer üblichen Abwassercharakteristik erklären. Mögliche Erklärungen können spezifische Einleitungen oder ggf. auch eingesetzte Anlagentechnik auf dem Technikum (verwendete Edelstahlarmaturen/ Geräte) sein, dies ist zu prüfen.

Der Ni-Gehalt des im Hauptversuch 2 eingesetzten Schlammes liegt bereits praktisch um eine Größenordnung niedriger und nur noch wenig über dem Grenzwert. Nach der DüMV (2012) wäre sogar ein etwas höherer Grenzwert von 120 mg/kg bei P-Fällung erlaubt. Es ist zu erwarten, dass bei regulärem Anlagenbetrieb die Grenzwerte eingehalten werden können und ein als P-Düngemittel hoch wirksames Produkt zu gewinnen ist.

Hygiene

Die von AgroLab durchgeführten Analysen (Anlage 4) ergaben keine Anhaltspunkte auf relevante Krankheitserreger im Schlamm, so dass der Fällschlamm AL1 als hygienisch unbedenklich und daher als Düngemittel im vollen Umfang einsetzbar anzusehen ist.

7.3 Verwertungsorientierte Auswahl der Fällmittel

Für die verwertungsorientierte Auswahl der Fällmittel wurde vor den Hauptversuchen ein Vorversuch durchgeführt, in welchem der Einfluss der Phosphat-Fällung mit Fe- oder Al-Salzen untersucht wurde. Dabei wurden Reinsubstanzen mit Fe- und Al-Fällschlämmen verglichen. Für die Bilanzierung wurde jeweils der P-Gehalt der Nullkontrolle im Pflanzenaufwuchs abgezogen. Als Goldstandard wird immer zum Vergleich Triplesuperphosphat verwendet. Alle Nährstoffe außer P wurden für alle Varianten in gleicher Dosierung zugeführt.

7.3.1 Ziel und Durchführung der Vorversuche

Mit den Vorversuchen sollten nachfolgende Fragen beantwortet werden:

- Wirkt sich die Verwendung von Eisen- oder Aluminium-haltigen Mitteln zur Fällung von Phosphat aus Abwasser auf die P-Pflanzenverfügbarkeit der entstehenden Fällschlämme aus?
- Ist FePO_4 im eingesetzten Standardsubstrat schlechter pflanzenverfügbar als AlPO_4 ?

Als Pflanzenarten wurden eingesetzt:

- Welsches Weidelgras (*Lolium multiflorum*)
- Luzerne (*Medicago sativa*)
- Mais (*Zea mays*)

- Raps (*Brassica napus*)

Folgende Ansätze wurden untersucht:

1. Kontrolle ohne P (Nullkontrolle)
2. AlPO_4 als Laborchemikalie
3. FePO_4 als Laborchemikalie
4. Al-Fällschlamm
5. Fe-Fällschlamm
6. Triplesuperphosphat (TSP)

Die Versuchsrandbedingungen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Düngungsstufe: 40 mg P / kg Boden (entspricht ca. 120 kg P/ha)
- Gefäßtyp: Hoher 3 Liter Topf (2,4 kg Substrat)
- Anlage in drei Wiederholungen
- Vier Schnitte bei Weidelgras und Luzerne (Ernte je nach Witterung ca. alle 4 Wochen)
- Anzahl Gefäße: 4 Pflanzenarten x 6 P-Quellen x 3 Wiederholungen = 72

7.3.2 Ergebnisse der Vorversuche

Abbildung 7-16 zeigt als Beispiel den Aufwuchs von Weidelgras vor dem 1. Schnitt. Abbildung 7-17 zeigt den Biomasseertrag von Weidelgras in 4 konsekutiven Schnitten. Zu beachten ist dabei, dass der erste Aufwuchs aufgrund ungünstiger Wachstumsbedingungen (Temperatur) noch etwas geringer war. Die Biomasseerträge pro Erntetermin sind mit verschiedenen Kleinbuchstaben bei $p = 5\%$ signifikant verschieden, unterschiedliche Großbuchstaben zeigen eine bei $p = 5\%$ signifikant verschiedene Gesamtbiomasse an. Analog sind die Kennzeichnungen in nachfolgenden Abbildungen des Biomasseertrags und P-Entzugs.

Das Biomassewachstum ist zwischen den Behandlungen nur wenig unterschiedlich, wobei das reine AlPO_4 sogar den Goldstandard TSP übertroffen hat, auch wenn die Unterschiede vergleichsweise gering sind. Al-Fällschlamm hat so gut abgeschnitten wie TSP, wobei der Fe-Fällschlamm gegenüber den übrigen Behandlungen signifikant schlechter abschnitt, besonders in den Folgeernten. Das gute Abschneiden des Al-Phosphats lässt sich u. a. dadurch erklären, dass die Wasserlöslichkeit etwas unter der von TSP liegt, so dass zunächst weniger P an dem Substrat mit einer hohen Austauschkapazität fixiert wird, aber dafür im Laufe des Wachstums P sehr gut nachgeliefert werden kann.

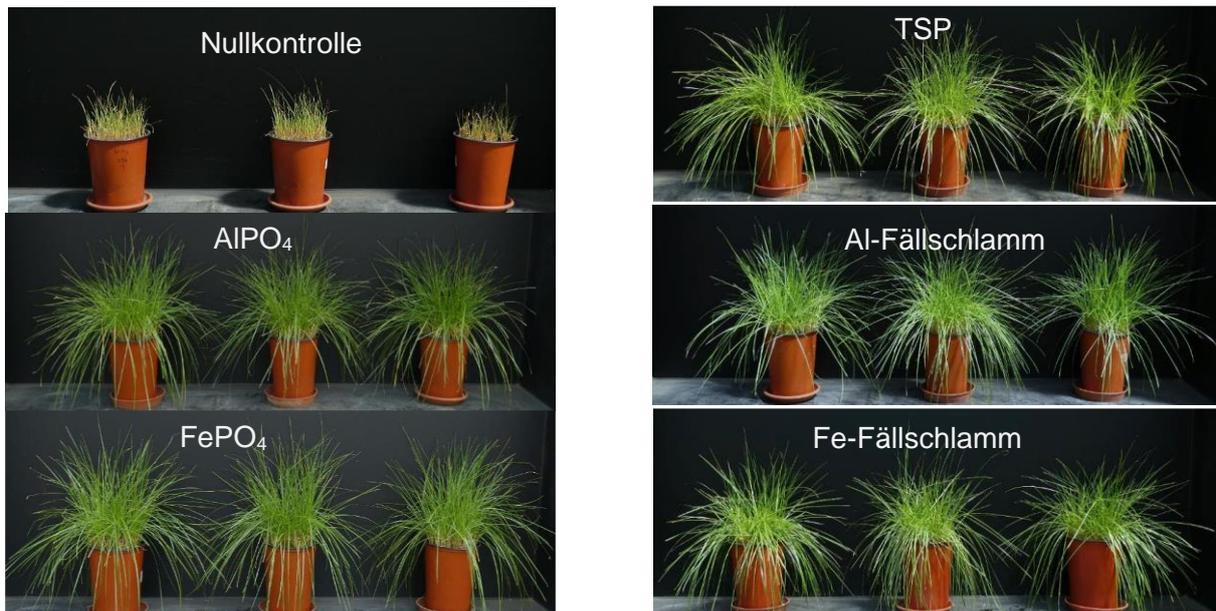


Abbildung 7-16: Aufwuchs von Weidelgras vor dem ersten Schnitt

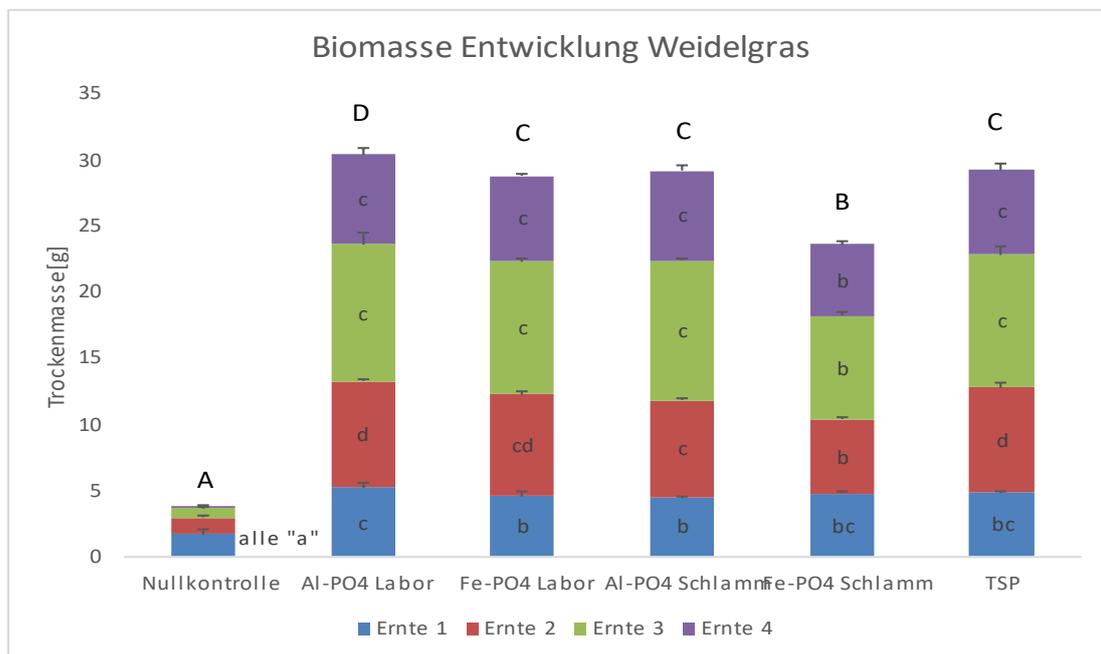


Abbildung 7-17: Biomasseertrag von Weidelgras [g TS/Gefäß] in 4 konsekutiven Schnitten (zu beachten: niedrige Temperatur beim ersten Aufwuchs)

Abbildung 7-18 zeigt die Ergebnisse des parallelen Versuchs mit Luzerne. Diese zeigen deutlich eine geringere Effizienz für Fe-Phosphat und Fe-gefällten Schlamm, während auch hier das reine Al-Phosphat (kurz: Al-P) wieder die Ergebnisse des TSP beim letzten Schnitt

übertrifft. Dies zeigt, dass das Al-P weniger stark festgelegt wird und über einen längeren Zeitraum verfügbar bleibt. Während der Al-gefällte Schlamm gegenüber TSP für den ersten Aufwuchs eine etwas verringerte Anfangswirkung zeigt, bringt der letzte Schnitt eine signifikant höhere Biomasse, so dass der Gesamtertrag gleich dem von TSP ist. Dies bedeutet, dass Al-Fällung eine wesentlich bessere P-Wirkung bei weniger P-effizienten Pflanzen bewirkt.

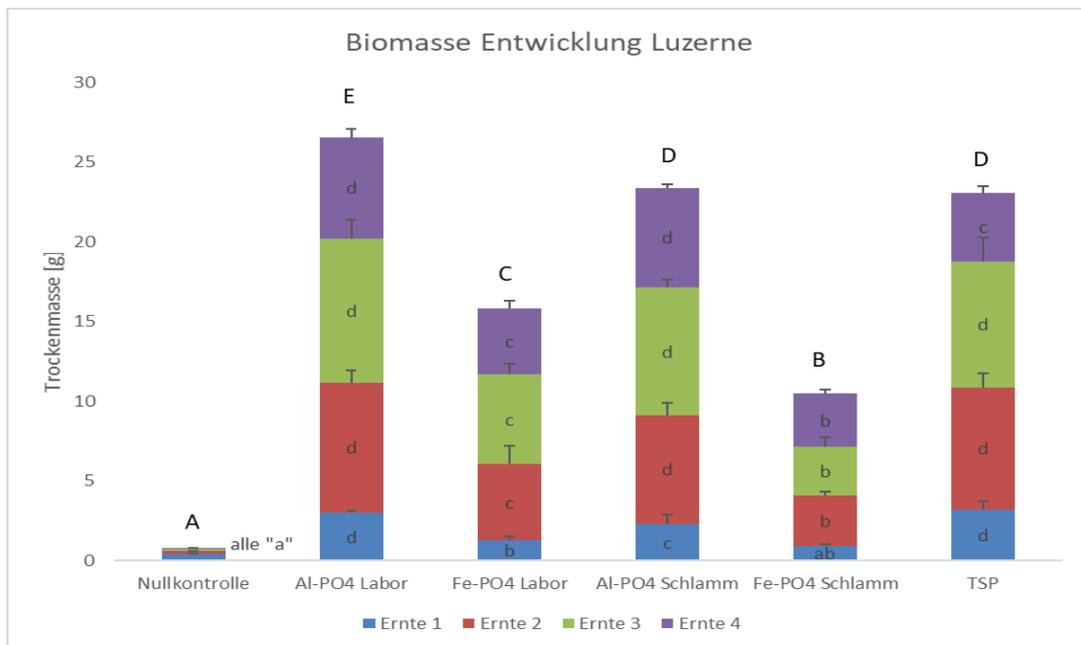


Abbildung 7-18: Biomasseerträge [g TS/Gefäß] von Luzerne in 4 konsekutiven Schnitten

Raps ist eine sehr P-effiziente Art, was auch in den nicht signifikanten Unterschieden des Biomasseaufwuchses sichtbar wird (Abbildung 7-19), ganz im Gegensatz zu Mais (Abbildung 7-20), der aus dem Fe-Fällschlamm kaum P aufnehmen und wachsen kann. Auch aus dem reinen Fe-P resultiert beim Mais nur eine deutlich geringere Biomassebildung, während das reine Al-P wieder über dem TSP liegt und auch der Al-Schlamm im Vergleich zum Fe-Schlamm recht gut abschneidet.

Wegen der hohen P-Aufnahmeeffizienz von Raps zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in der Biomasseproduktion.

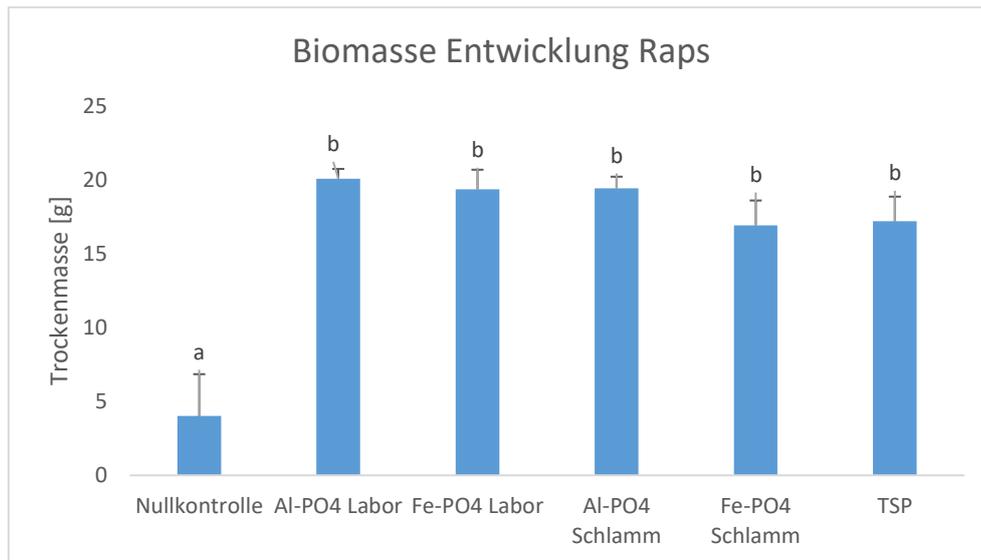


Abbildung 7-19: Biomasseerträge [g TS/Gefäß] von Raps

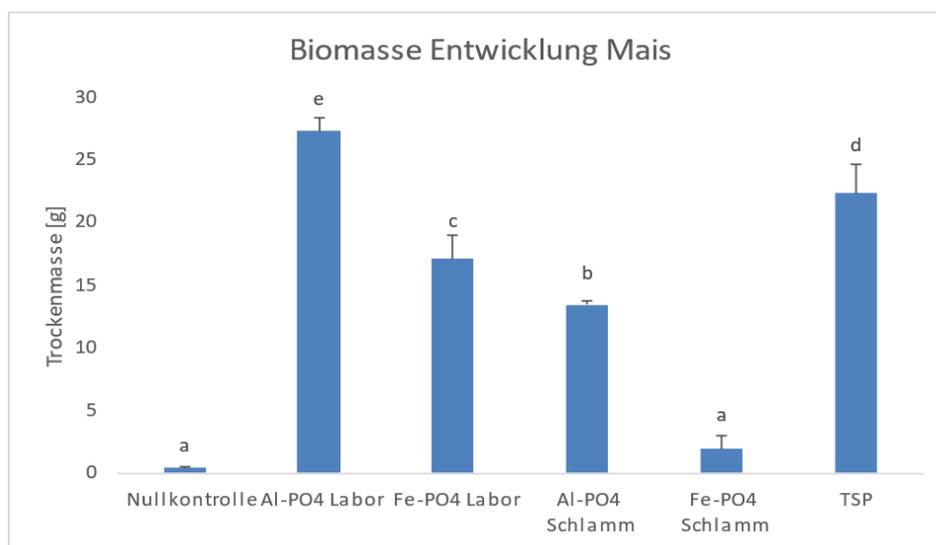


Abbildung 7-20: Biomasseerträge [g TS/Gefäß] von Mais

Mais verfügt ohne Mycorrhizierung (wie im Substrat von HGoTECH) über eine nur geringe P-Effizienz, was sich an dem sehr geringen Wachstum nach Düngung des Fe-Schlammes zeigt, stellt also hinsichtlich des P-Aneignungsvermögens den „worst case“ dar.

Noch deutlicher werden die Unterschiede, wenn man nicht nur die Biomassebildung, sondern die gesamten P-Entzüge der oberirdischen Pflanzenteile miteinander vergleicht, i. e. Biomasse x P-Gehalte im Pflanzenmaterial. In Abbildung 7-21 und Abbildung 7-22 wird deutlich, dass die sehr gute Ertragswirkung von reinem Al-P auf die bessere P-Nachwirkung zurückzuführen ist. Die P-Entzüge machen auch sehr deutlich, dass die geringere Ertragswirkung von Fe-P und Fe-Fällschlamm durch die geringere P-Verfügbarkeit bedingt ist.

Stärker ist der Einfluss der P-Verfügbarkeit für Luzerne (Abbildung 7-22), da die Luzernewurzeln offensichtlich weniger effizient im Aufschluss von Fe-P und Fe-P im Fällschlamm sind, beruhen die Unterschiede in der Biomassebildung auf der unterschiedlichen P-Verfügbarkeit für Luzerne.

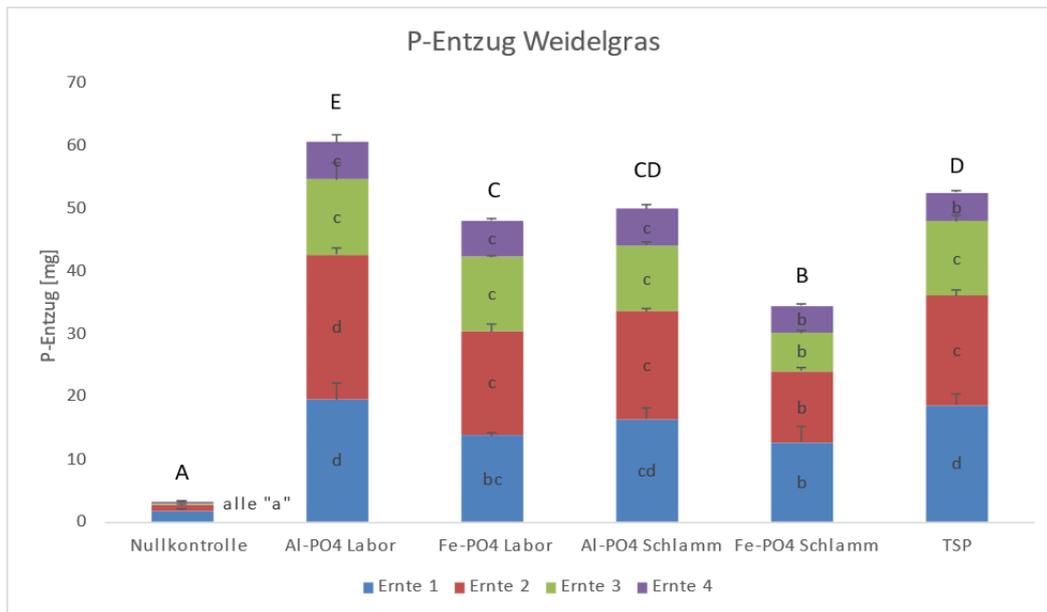


Abbildung 7-21: P-Entzüge von Weidelgras [mg /Gefäß] in 4 konsekutiven Schnitten, hier Bezugsgröße oberirdische Pflanzenteile (s. a. Abbildung 7-17)

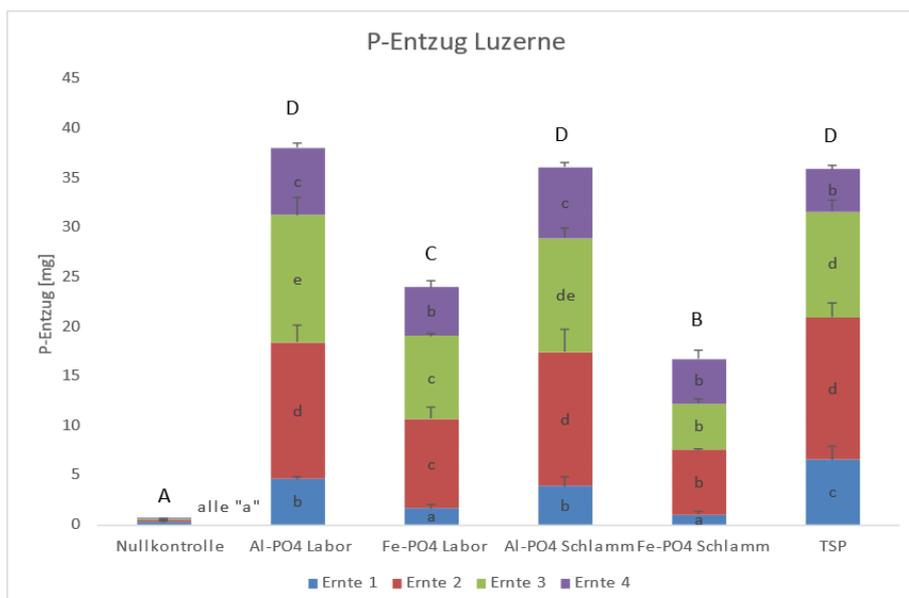


Abbildung 7-22: P-Entzüge von Luzerne [mg /Gefäß] in 4 konsekutiven Schnitten (s. a. Abbildung 7-18); hier Bezugsgröße oberirdische Pflanzenteile

Beim P-effizienten Raps (Abbildung 7-23) war anscheinend sogar der unmittelbar verfügbare Anteil an P bei TSP so hoch, dass es zu einer geringeren Biomasseproduktion im Vergleich zum reinen Al-P kam. Dies könnte durch einen geringeren Anteil an pflanzenverfügbarem oder physiologisch verwertbaren Zink (Zn) erklärt werden.

Betrachtet man die P-Entzüge von Mais (Abbildung 7-24), wird zum einen deutlich, dass der Fe-gefällte Schlamm eine deutlich geringere P-Verfügbarkeit für Mais aufweist, während die reine Laborchemikalie Al-P von TSP nicht signifikant verschieden ist. Das reine Fe-P führt hier zu einem signifikant geringeren P-Entzug gegenüber TSP. Der Fe-gefällte Schlamm zeigt erwartungsgemäß eine sehr geringe P-Aufnahme durch Mais, der in dieser Behandlung durch P-Mangel in der Entwicklung sehr stark gehemmt und bei Versuchsende praktisch abgestorben war.

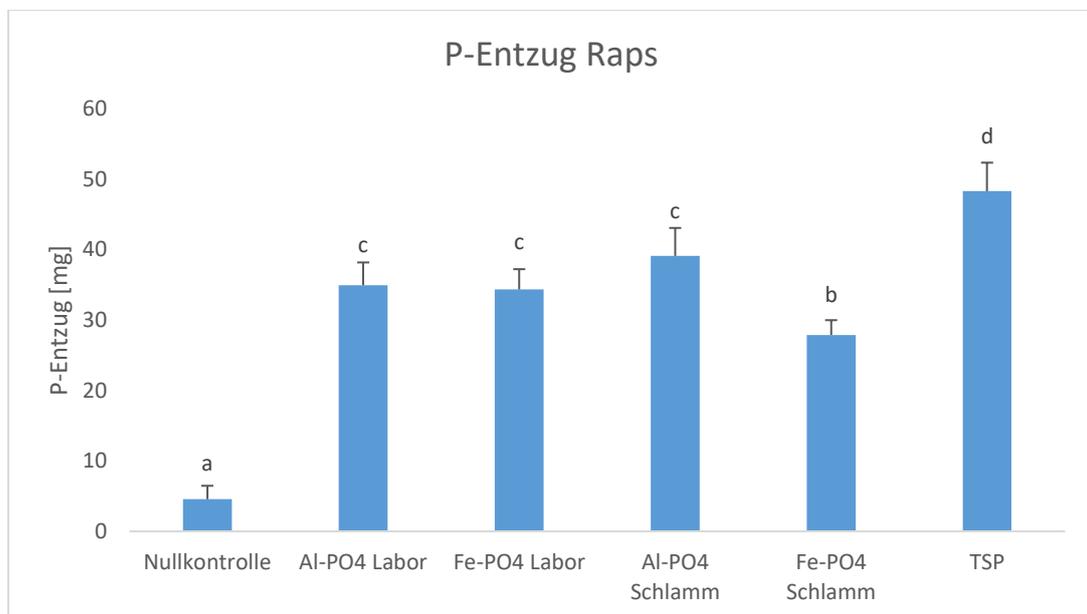


Abbildung 7-23: P-Entzüge [mg P/Gefäß] von Luzerne

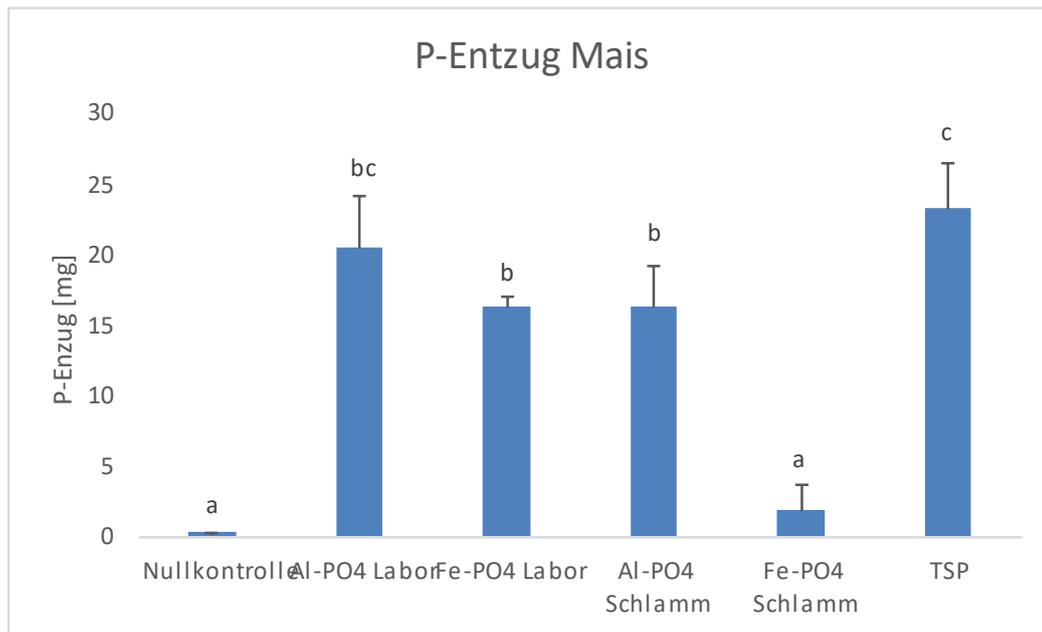


Abbildung 7-24: P-Entzüge [mg P/Gefäß] von Mais

7.3.3 Fazit der Vorversuche zum Einfluss des Fällmittels

Aus den dargestellten Vorversuchen lassen sich nachfolgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die verschiedenen Pflanzenarten erschließen die P-Quellen unterschiedlich gut, wobei Raps das beste Aneignungsvermögen zeigt.
- Al-Phosphate steuern mehr pflanzenverfügbares P bei als Fe-Phosphate.
- Die reinen Laborchemikalien (Fe- und Al-Phosphate) führen zu höheren P-Verfügbarkeiten als die Schlämme. Dabei schneidet Fe-Fällschlamm durchweg schlechter ab als Al-Fällschlamm, der zwar nicht ganz die P-Verfügbarkeit des reinen Al-P erreicht, aber durchaus eine gut verfügbare P-Quelle darstellt.
- Für die P-Verfügbarkeit spielen nicht nur die Bindungsformen der gefällten Phosphate eine Rolle, sondern auch der Überschuss an Fällmittel im Schlamm, der auch unter Feldbedingungen zur Bildung von stark Phosphat-sorbierenden Fe-/ Al-Oxidhydraten führt.
- Es ist eindeutig, dass Al-Fällung mit einem so gering wie möglich zu haltenden Überschuss an Al zu einem Produkt mit hoher Pflanzenverfügbarkeit führt, während Fe-Fällung besonders für weniger P-effiziente Kulturen wie Mais nur eine geringe Düngewirkung zeigt.

7.4 Zusammenfassende Bewertung der Verwertungspotentiale des Fällschlammes

Der gewonnene und im Hauptversuch 2 eingesetzte Fällschlamm mit der Bezeichnung AL1 weist eine dem Goldstandard Triplesuperphosphat mindestens gleichwertige P-Düngewirkung auf und kann als wirksames Düngemittel eingesetzt werden. Das Produkt ist hygienisch unbedenklich und die Schwermetallgehalte liegen mit einer Ausnahme unter den Grenzwerten, wobei für das Element Nickel noch zu prüfen ist, wie der Eintrag in den getesteten Schlämmen zustande gekommen ist und welche Maßnahmen ergriffen werden können, um unterhalb der Grenzwerte zu bleiben.

Insgesamt ist zu beachten, dass nach der DüMV (2012), Anlage 2, unter 7.4.3 geregelt ist, dass für zulässige Schlämme die folgenden Regeln gelten:

- Zugabe von Kalk nur in einer Qualität, die zugelassenen Düngemitteln entspricht.
- Zugabe von Bioabfällen, nur im Rahmen der Aufbereitung (z. B. im Faulturn) und nur in einer Qualität, die der Bioabfallverordnung entspricht.
- Aufbereitung der Ausgangsstoffe nur mit Stoffen, die der notwendigen Abwasser- und Schlammbehandlung einschließlich Hygienisierung oder sonstigen notwendigen Behandlung dienen.
- Keine Rückführung von Rechengut, Sandfanggut; keine Rückführung von Flotaten oder Fettabscheiderinhalten aus fremden Klärwerken (jeweils auch nicht im Rahmen der Schlammaufbereitung).
- Angabe der bei der Aufbereitung zugegebenen Stoffe und des jeweiligen Zwecks der Zugabe (z. B. zur Konditionierung, Hygienisierung, Fällung), bei der Zugabe von Kal-ken Angabe des zugegebenen Anteils in %.

Für den Einsatz von Fällmitteln zur P-Fällung sind in Anlage 2 der DüMV (2012) die Regelungen unter 8.1.4 zur Fällung von Phosphor und Schwefel zu beachten:

- Bei Verwendung von Eisensalz, Eisenoxiden, Eisenoxihydroxid oder Eisenhydroxid in Biogasanlagen, die bis zu einer Menge von maximal 0,1 % bezogen auf die Frischmasse des aufzubereitenden Stoffes zur Bindung von Sulfiden einbezogen werden können, gilt für das zugegebene Fällungsmittel eine Erhöhung der Grenzwerte nach Tabelle 1.4:
 - für Arsen, Zeile 1.4.1 Spalte 4: 80 mg/kg TM,
 - für Nickel, Zeile 1.4.6 Spalte 4: 120 mg/kg TM.
- Bei Fällung mit Eisen- oder Aluminiumsalzen ist im Rahmen der Hinweise zur sachgerechten Anwendung auf eine mögliche verringerte Wirksamkeit des Phosphates hinzuweisen.

Nach den vorgestellten Versuchsergebnissen ist hier eindeutig die Fällung mit Aluminiumsalz wesentlich weniger kritisch zu sehen als die Fällung mit Eisensalz.

8 Fazit

Eine Vielzahl der aktuell entwickelten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung konzentriert sich auf die Klärschlammasche, womit technisch und wirtschaftlich aufwendige Lösungen erforderlich werden. Im vorliegenden Projekt wurde ein Verfahren zur Phosphorrückgewinnung direkt als Bestandteil der Abwasserreinigung bzw. Schlammbehandlung untersucht. Bei diesem wurde ein Verfahrenskonzept zur Gewinnung eines mit Phosphor angereicherten Fällschlammes als separater Stoffstrom einer Nachfällung ausgearbeitet. Neben der theoretischen Betrachtung erfolgte eine Erprobung des Verfahrens auf der Technikumsanlage des Großklärwerks Emschermündung.

Um das Potential der Rückgewinnung mit dem separaten Stoffstrom auszuschöpfen, wurde die Phosphorelimination ohne Simultanfällung mit ausschließlicher Nachfällung erprobt. Um das originäre Ziel der Abwasserreinigung sicher zu stellen, galt es im ersten Schritt die grundsätzliche Funktion der Nachfällung zu bewerten. Es zeigte sich, dass eine gute P-Elimination mit alleiniger Nachfällung möglich ist, auch bei hohen Ausgangskonzentrationen.

Mit Einsatz zweier verschiedener Fällmittel (Eisen-III-chloridsulfat und Aluminiumsulfat) wurden die untersuchten Zielwerte von 0,7 mg/l bis zu 0,1 mg/l Orthophosphat sicher eingehalten. Der Fällmittelverbrauch lag dabei mit β -Werten von 2 bis 3 bei Zielwerten bis 0,3 mg/l in einem üblichen Bereich für eine Nachfällung. Bei Zielwerten von 0,1 mg/l Orthophosphat ergaben sich β -Werte von ca. 4 bis 6. Zielwerte von 0,3 und 0,1 mg/l Orthophosphat sind im Vergleich zu den Anforderungen der Abwasserverordnung (AbwV) weitergehende Anforderungen, wie sie etwa zur Umsetzung der EU-Wasserrahmenrichtlinie in verschiedenen Maßnahmenprogrammen und Bewirtschaftungsplänen der Länder gefordert werden.

Zur Feststoffabscheidung des Fällschlammes wurden parallel ein Raumfilter (Dynasand-Filter) und ein Flächenfilter (Trommelfilter) eingesetzt. Es zeigte sich ein gut abscheidbarer Fällschlamm und ein grundsätzlich guter Rückhalt des Fällschlammes mit den Filteranlagen und damit auch eine gute Elimination von P_{ges} . Die Auswertung der Feststoffbeladung für die Filteranlagen zeigte bei regulärem Betrieb der Anlage keine kritischen Werte. Zeitweise lag störungsbedingt Schlammabtrieb im Ablauf der Nachklärung und damit verbunden eine unzureichende Leistung der Filteranlagen vor. Diese überhöhten Werte waren jedoch nicht auf das Verfahrenskonzept zurückzuführen. Im Laufe der Versuche erfolgte ein Umschluss des Zulaufs zum Technikum, insgesamt ergab sich damit ein stabilerer Anlagenbetrieb.

Ein weiterer Untersuchungspunkt von besonderem Interesse ist bei dem entwickelten Verfahren die Abreicherung im zu entsorgenden Schlamm im Vergleich zur geforderten Reduzierung der Phosphorgehalte auf $< 20 \text{ g / kg}$ Trockenmasse (TM) gemäß der AbfklärV (2017).

Die rechnerische Bilanzierung der Feststoffe und des Phosphors für zwei mögliche Anlagenkonstellationen des entwickelten Verfahrenskonzeptes mit Standard-Bemessungswerten ergab für eine aerob oder anaerob stabilisierende Anlage ohne vermehrte biologische P-Elimination (Bio-P) einen Wert von $15,3 \text{ g P / kg TR}$ im zu entsorgenden Schlamm und damit eine deutliche Unterschreitung der Forderung der Verordnung. Im Überschussschlamm ergibt

sich für eine Belebungsanlage mit Faulung (ohne Bio-P) ein feststoffbezogener Phosphorgehalt von 18,9 g P / kg TR.

Bei den praktischen Versuchen lagen einzelne Werte des feststoffbezogenen Phosphorgehaltes im Überschussschlamm um 20 g P / kg TR, im Mittel lagen die Werte höher. Zu beachten ist dabei die hohe Phosphorinkorporation auf dem Technikum, trotz Außerbetriebnahme der vermehrten biologischen Phosphorelimination. Maßgebend ist der Wert im zu entsorgenden Schlamm. Die Anlage wurde zeitweise um den Betrieb einer anaeroben Stabilisierung für einen Teilstrom ergänzt. Nach Umstellung des Zulaufs lagen die Werte des feststoffbezogenen P-Gehaltes im Faulschlamm unter 20 g P / kg TM. Weitere Untersuchungen auf einer Anlage inkl. Vorklärung und Faulung mit Analysen im Roh- und Faulschlamm sind zu empfehlen.

Zur Beurteilung der Verwertungspotentiale des gewonnenen Stoffstroms wurden u. a. die Möglichkeit zur Aufkonzentrierung, die düngemittelrechtlichen Anforderungen und die Pflanzenverfügbarkeit untersucht.

Den Stoffstrom zur Phosphorrückgewinnung bildet bei dem entwickelten Verfahrenskonzept der Fällschlamm der Nachfällung bzw. das Spülwasser der Filteranlagen. In diesem wurde ein hoher Phosphorgehalt von im Mittel 109 g P / kg TR erreicht.

Zur Aufkonzentrierung des gewonnenen Stoffstroms wurde entsprechend den Ergebnissen einer Marktrecherche ein Dekanter erprobt. Es konnte einstufig eine Aufkonzentrierung von 10 - 18 % ohne Polymer und 20 - 32 % mit Polymer erreicht werden. Dies ist angesichts der geringen Feststoff-Ausgangskonzentration von im Mittel 300 mg/l eine gute Aufkonzentrierung.

Zur Untersuchung der Pflanzenverfügbarkeit des enthaltenen Phosphats wurden standardisierte Pflanzenversuche mit verschiedenen Pflanzenarten durchgeführt. Mit den verschiedenen Pflanzenarten konnte jeweils ein unterschiedliches Aneignungsvermögen untersucht werden. Der Fällschlamm mit Einsatz von Aluminiumsulfat zeigte dabei eine sehr gute Pflanzenverfügbarkeit, bei vielen Versuchen vergleichbar mit dem Goldstandard Triple-Superphosphat. Beim Einsatz von Eisen-III-chloridsulfat als Fällmittel zeigte sich eine Pflanzenverfügbarkeit auf deutlich geringerem Niveau.

Die Schwermetallgehalte des Fällschlamms wurden gemäß den durchgeführten Analysen als unkritisch und unter den Grenzwerten liegend bewertet. Bei einzelnen Proben waren Werte beim Nickel ungewöhnlich hoch und über dem Grenzwert, die Ursache ist zu klären.

Das entwickelte Verfahren im P-Rec-Projekt zeigt ein großes Potential als alternatives Verfahren zur Umsetzung der P-Rückgewinnung. Mit der praktischen Erprobung wurden gute Ergebnisse zur grundsätzlichen Funktion der alleinigen Nachfällung und der Separation des Fällschlamms gezeigt. Auch eine Phosphorelimination mit weitergehenden Anforderungen wurde erreicht. Die Verlagerung des Phosphors in den separaten Stoffstrom ist gegeben. Mit dem Einsatz von Aluminiumfällmittel wurde eine sehr gute Pflanzenverfügbarkeit und damit Verwertbarkeit als Düngemittel aufgezeigt.

Das Verfahren beinhaltet mit dem Einsatz der Filteranlagen Synergieeffekte mit der vierten Reinigungsstufe zur Mikroschadstoffelimination und z. B. auch mit weitergehenden Zielen der Mikroplastikentfernung.

Es empfiehlt sich zur Weiterentwicklung und Etablierung des P-Rec-Verfahrens mit weiteren Untersuchungen Wissenslücken zu schließen und die Ergebnisse zu verifizieren. Ein wesentlicher im Detail weiter zu untersuchender und zu verifizierender Punkt ist die Abreicherung des spezifischen Phosphorgehaltes unter 20 g P / kg TM im zu entsorgenden Schlamm. Idealerweise kann dabei eine Anwendung des P-Rec-Verfahrens mit Bilanzierung der Stoffströme einer Gesamtanlage erfolgen. Weiterhin von großem Interesse ist die Erweiterung der Anwendung des P-Rec-Verfahrens für Anlagen mit gezielter, vermehrter biologischer Phosphorelimination oder Anlagen mit einer hohen Phosphorinkorporation im belebten Schlamm aufgrund spezifischer Verhältnisse. Bei diesen ergibt sich bilanziell im zu entsorgenden Schlamm auch beim P-Rec-Verfahren mit ausschließlicher Nachfällung ein höherer Phosphorgehalt. Dazu ist die Erprobung einer verfahrenstechnischen Erweiterung mit einer technisch möglichst einfachen, zusätzlichen P-Abscheidung im Schlamm oder Schlammwasser möglich. Der anfallende Stoffstrom kann mit dem Stoffstrom der Nachfällung weiter behandelt und genutzt werden.

Der aktuelle Stand der Phosphorrückgewinnung in Verbindung mit den Zeitzielen der Klärschlammverordnung, einer Umsetzung bis 2029/2032, zeigt die dringende Notwendigkeit zur weiteren, intensiven Auseinandersetzung mit den Verfahren zur Phosphorrückgewinnung. Die Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche zur Erzielung der erforderlichen Rückgewinnungsquote sind technisch sehr aufwendig. Der Großteil dieser Verfahren ist in der Entwicklung und Erprobung, es liegen kaum belastbare Erfahrungswerte großtechnischer Anlagen zum Betrieb und zu den Kosten vor. Die Weiterentwicklung alternativer Ansätze, wie dem vorgestellten P-Rec-Verfahren, ist daher von großem Interesse.

Literaturverzeichnis

- AbfKlärV. (27. September 2017). Abfallklärschlammverordnung: Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost. (BGBl. I S. 3465), zuletzt geändert durch Artikel 137 der Verordnung vom 19. Juni 2020 (BGBl. I S. 1328).
- AbwV. (21. 03 1997). Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung - AbwV) in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt. *Abwasserverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 17. Juni 2004 (BGBl. I S. 1108, 2625), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 17. April 2024 (BGBl. 2024 I Nr. 132) geändert worden ist.*
- Böhler, M. und Siegrist, H. (2018). Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen, Gutachten der EAWAG im Auftrag der Europa Fachhochschule Fresenius und des hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie
- DüMV. (2012). Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV) vom 5. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2482), . *zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 02. Oktober 2019 (BGBl. I S. 1414).* Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz.
- DWA. (Mai 2011). Arbeitsblatt DWA-A 202 - Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWA. (Juni 2016). Arbeitsblatt DWA-A 131 - Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWA. (Februar 2019). Arbeitsblatt DWA-A 203. Abwasserfiltration durch Raumfilter nach biologischer Reinigung. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- DWA. (Juni 2019). Phosphorelimination - Optimierung auf Kläranlagen - Praxisleitfaden für den Betrieb von Kläranlagen - 2. Auflage, Hrsg. DWA-Landesverband Baden-Württemberg, Autoren Baumann P. und Jedele K., Heft 14, ISBN 978-3-88721-815-7.
- DWA. (Oktober 2020). Merkblatt DWA-A 206 Automatisierung der chemischen Phosphatelimination. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
- Emschergenossenschaft. (2022). *Betriebsanweisung Technikum 2022.*
- Fundneider, T. (16. 03 2022). Persönliche Mitteilung.

Mecana Umwelttechnik GmbH. (07. 03 2022). Von http://www.mecana.com/images/sampledData/PDF/Downloads/Tuchfilter/DE/Polstofffiltration_Broschre_0418A_k.pdf abgerufen

Metcalf & Eddy (2014). Wastewater Engineering - Treatment and Resource Recovery. 5th Edition. McGraw-Hill International Edition.

Nordic Water GmbH. (02. 03 2022). Von Online: <https://www.nordicwater.comhttps://www.nordicwater.com/wp-content/uploads/2016/07/S1501-DynaSand-brochure-DE-1.pdf> abgerufen

OGewV. (20. Juni 2016). Verordnung zum Schutz der Oberflächengewässer (Oberflächengewässerverordnung - OGewV), (BGBl. I S. 1373),), zuletzt geändert durch Artikel 2 des Gesetzes vom 9. Dezember 2020 (BGBl. I S. 2873).

Anlagen

Anlage 1: Datenblatt Fällmittel Eisen-III-Chloridsulfat

Anlage 2: Datenblatt Fällmittel Aluminiumsulfat

Anlage 3: Datenblatt Fäll- und Flockungsmittel Brenntafloc AS 4

Anlage 4: Prüfberichte zum Fällschlamm (AGROLAB LUFA GmbH)



FERRIFLOC

Eisen-III-chloridsulfat-Lösung

Fällungs- und Flockungsmittel zur

- Phosphatelimination
- Blähschlammbekämpfung
- Entlastungsflockung
- Schwefelwasserstoffelimination
- Trink- und Brauchwasseraufbereitung
- Kühlturmzusatzwasseraufbereitung
- Schlammkonditionierung
- Industrieabwasserreinigung

Formel	FeClSO ₄
Lieferform	dunkelbraune, ca. 41%ige Lösung
Europa-Norm	EN 891

Wirksubstanz 123 g Fe/kg \triangleq 2,20 mol/kg

Typische Zusammensetzung	Eisen (Fe ³⁺)	12,3	%
	Eisen (Fe ²⁺)	0,07	%
	Unlösliches	< 0,02	%
	Chlorid	7,8	%

Spurengehalte	As < 0,1 mg/kg*	Pb < 1 mg/kg
	Cd < 0,1 mg/kg*	Sb < 0,1 mg/kg*
	Cr 8 mg/kg	Se < 0,1 mg/kg*
	Cu 1 mg/kg	Zn 65 mg/kg
	Hg < 0,01mg/kg*	AOX 8 mg/kg
	Ni 32 mg/kg	

* Nachweisgrenze

Dichte 1,52 g/cm³

Anlieferung lose in gummiertem Tankfahrzeug
oder abgefüllt in Kunststoffcontainern
oder -kannen

pH-Wert	<1
Verbrauch an Säurekapazität ($K_{S4,3}$)	0,44 mmol/100 mg
Anwendungskonzentration	unverdünnt in Lieferform oder bis max. 1:30 mit Wasser verdünnt
Gefrierpunkt	<p>ab ca. -10 °C starke Zunahme der Viskosität* ab ca. -15 °C beginnende Kristallisation*</p> <p>* Durch gezielte Verdünnung mit Wasser kann sowohl die Viskosität gesenkt als auch die Kristallisation verhindert werden, so dass für den Winterbetrieb keine Einschränkungen bestehen. Tabellen für die Eigenverdünnung (Vorlage von Wasser in den Lagertank) sind auf Anfrage erhältlich. Unter dem Stichwort „Winterware“ ist eine verdünnte (modifizierte) Qualität mit 10 % Eisen (Dichte: $1,4\text{ g/cm}^3$) auch direkt ab Werk lieferbar. Bei geringen Durchsatzmengen und langen Lagerzeiten sollte ganzjährig mit verdünntem Produkt gearbeitet werden.</p>
Lagerung	Bei ≤ 5 TKW-Anlieferungen FERRIFLOC pro Jahr wird eine Wasservorlage in den Lagertank von 5-10 % oder $1\text{-}2\text{ m}^3$ pro Anlieferung empfohlen. Unabhängig davon sollte der Lagertank jährlich gespült werden.
Empfohlene Werkstoffe	alle gängigen Kunststoffe mit Ausnahme von Polyamid
Sicherheit	Vor Gebrauch des Produktes bitte die Hinweise im Sicherheitsdatenblatt beachten.

Diese Ausführungen sollen dem Verbraucher Hinweise und Anregungen geben; sie erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit und sind unverbindlich. Gesetzliche Bestimmungen, auch hinsichtlich etwaiger Schutzrechte Dritter, müssen in jedem Fall beachtet werden.

KRONOS INTERNATIONAL, Inc.

KRONOS ecochem

Peschstr. 5 · D-51373 Leverkusen

Telefon +49 214 356-0 · Telefax +49 214 44117

E-Mail: kronos.ecochem@kronosww.com

www.kronosecochem.com

© KRONOS 2019

DS2248DE/419DE

FERRIFLOC



Produktinformation**Brenntafloc AS 4**

Produkt	Brenntafloc AS 4 ist ein hochwirksames Flockungs- und Fällungsmittel auf Aluminium-Basis und besonders geeignet für die Wasseraufbereitung und Abwasserbehandlung.
Verwendung	Durch gezielte Dosierung kann das Produkt in allen Fällungsverfahren und für viele Flockungsvorgänge (Vorflockung, Flockungsfiltration) angewendet werden. Es gewährleistet die P-Elimination ebenso wie eine Flockung von Suspensa aus Abwasser und die Bekämpfung von Fadenbakterien.
Aussehen	klare Flüssigkeit, farblose Lösung von Aluminiumsulfat in Wasser
techn. Daten	pH-Wert 2,0 ± 0,5 Dichte (20°C) 1,32 g/cm ³ Viskosität (20°C) 13 ± 5 mPa•s Gehalt an Al ₂ O ₃ 8,15 ± 0,15% Wirksubstanz ca. 1,61 mol/kg Beginn der Kristallisation bei - 10 °C
Analyse	Spurengehalte in mg/kg: Cd < 0,02 Ni < 0,5 Cr < 0,6 Pb < 0,5 Cu < 1,0 Zn < 2,0 Hg < 0,02
Anwendung Dosierung	Brenntafloc AS 4 sollte unverdünnt an turbulenter Stelle dosiert werden. Unsere Kundenbetreuer der regionalen Niederlassungen beraten Sie gerne bei Ihren individuellen Fragestellungen.
Lagerung	Beim Umgang mit Brenntafloc AS 4 müssen säureresistente Materialien (GFK, PE, gummierter Stahl) verwendet und die allgemeinen Schutzmaßnahmen für den Umgang mit Säuren beachtet werden. Eine regelmäßige Inspektion der Tank- und Dosieranlage ist empfehlenswert.
Qualität	Brenntafloc AS 4 erfüllt die Anforderungen der EN-Norm 878:2004 für „Produkte zur Aufbereitung für den menschlichen Gebrauch“, Typ 1 und dem DWA Arbeitsblatt A 202.
Haltbarkeit	Bei sachgerechter Lagerung 12 Monate.
Lieferung	IBC Container (1.000 L) und im Tankwagen.
Sicherheit	Die Hinweise aus dem Sicherheitsdatenblatt gemäß REACH sind zu beachten.

Vorstehende Angaben entsprechen unseren derzeitigen Kenntnissen. Diese Informationen entbinden den Kunden nicht von der Verpflichtung zur Wareneingangskontrolle gemäß § 377 HGB. Anwendung und Verarbeitung unserer Produkte liegen ausschließlich im Verantwortungsbereich des Anwenders. Der Anwender ist nicht davon befreit, die Eignung und Anwendungsmöglichkeiten für den vorgesehenen Zweck zu prüfen. Daher schließen wir hierfür jegliche Haftung unsererseits aus.

Brenntag GmbHMessealle 11
45131 EssenTelefon: +49 (0) 20 6496 14 10
E-mail: wasserchemie@brenntag.de

Stand: August 2019

Anhang 3 Datenblatt pFM für die maschinelle Schlamm entwässerung

PRODUKTINFORMATION

solenis.com



Seite 1 von 2

IWT-PDS-EMEA-Praestol K 332 L-R1

Praestol™ K 332 L Flockungshilfsmittel

Produktbeschreibung

Zusammensetzung:	hochmolekularer, stark kationischer Polyelektrolyt auf Basis von Acrylamid und einem kationischen Acrylsäurederivat
Aussehen:	weißliche Flüssigkeit
Ladungscharakter:	kationisch
Dichte:	ca. 1030 kg/m ³
Viskosität (Produkt):	500 - 5000 mPa·s
Viskosität (1,0 % In VE-Wasser):	ca. 5000 mPa·s
Viskosität (0,3 % In VE-Wasser):	ca. 1500 mPa·s
Viskosität (1,0 % In Leitungswasser*):	ca. 2000 mPa·s
Viskosität (0,3 % In Leitungswasser*):	ca. 100 mPa·s
pH-Wert (0,1 % In Leitungswasser*):	ca. 7
wirksam im pH-Bereich:	1 - 10

Die angegebenen Kenndaten sind technische Daten und stellen keine Spezifikationswerte dar.

Die Produktviskosität ist kein relevanter Parameter für die Wirksamkeit des Produktes. Sie dient nur als Hinweis zur Auslegung von Pumpen.

CAS-Nummer des Hauptbestandteiles ("Aktivsubstanz"): 69418-28-4 Ethanaminium, N,N,N-trimethyl-2-[(1-oxo-2-propenyl)oxy]-, chloride, polymer with 2-propenamide

Einsatzgebiete

Dieses Produkt wird in erster Linie bei der Entwässerung von kommunalen und industriellen Klärschlämmen (Zentrifugen, Siebbandpressen, Kammerfilterpressen etc.) verwendet. Es ist insbesondere für solche Anwendungsfälle geeignet, wo die gebildete Flocke starken Scherbeanspruchungen ausgesetzt ist.

Anwendung und Dosierung

Das Produkt wird in stark verdünnter Lösung (0,2 - 0,5 %ig) angewendet. Zur Herstellung von Stammlösungen (ca. 1 %ig) wird das Originalprodukt in vorgelegtes Wasser eingerührt. Nach einer Lösedauer von ca. 15 Minuten (bei einer Temperatur von ca. 20°C) ist die Lösung ausgereift und damit verwendungsfähig.

Aufgrund der sehr unterschiedlichen Eigenschaften der zu entwässernden Schlämme lassen sich die benötigten Zugabemengen nur anhand von Laborversuchen oder durch Betriebsversuche für den jeweiligen Anwendungsfall ermitteln.

Der Polymerverbrauch schwankt im Allgemeinen zwischen ca. 3 und ca. 10 kg Wirksubstanz Polymer

pro Tonne Schlamm-TS. In Anwendungen wie Eindickung oder Nachklärung sind niedrige Werte zu finden, schlecht entwässerbare Schlämme brauchen deutlich mehr Polymer.

Betriebssicherheit und Unfallschutz

Mögliche Gefahren: Vorsicht! Verschüttetes Produkt oder Produktlösung verursachen mit Wasser oder Feuchtigkeit erhöhte Rutschgefahr. Betroffene Stellen absichern. Produkt oder Lösung können in diesem Fall mit Adsorptionsmitteln, z. B. Sägemehl, Sand usw. aufgenommen und entsorgt werden. Wegen der akuten aquatischen Toxizität sollte das Eindringen in Gewässer und Boden vermieden werden. Nur geringe Reste mit starkem Wasserstrahl sorgfältig von der Straße wegspritzen, in die Kanalisation einleiten und der biologischen Abwasseraufbereitung zuführen.

Vorsichtsmaßnahmen: Persönliche Schutzausrüstung tragen (geeignete Handschuhe, Schutzbrille). Die beim Umgang mit Chemikalien üblichen Vorsichtsmaßnahmen und Regeln der Sauberkeit beachten.

Erste-Hilfe-Maßnahmen: Bei Augenkontakt lang anhaltend mit viel Wasser spülen und ggf. einen Arzt hinzuziehen. Nach Hautkontakt sofort mit viel Wasser und Seife reinigen und beschmutzte Kleidung ablegen. Wird das Produkt verschluckt, ärztliche Hilfe hinzuziehen.

Werkstoff: Aufgrund unserer Erfahrungen können die Produkte und Lösungen gegenüber üblichen Werkstoffen für Behälter und Rohrleitungen wie Kunststoffen, kunststoffbeschichteten Materialien und rostfreiem Stahl, als nicht korrodierend bezeichnet werden. Bedingt durch einen geringen Anteil organischer Lösungsmittel im Produkt müssen Kunststoffbehälter (Rohrleitungen, Pumpenteile), die mit dem unverdünnten Produkt in Berührung kommen, lösungsmittelbeständig sein.

Weitere Hinweise: Siehe Sicherheitsdatenblatt

Lagerhaltung

Das Produkt ist grundsätzlich gegen Feuchtigkeitseinwirkung wie Kondenswasser und Spritzwasser empfindlich. Beim Kontakt mit Wasser (Tropfen) kann es örtlich zur Knoten- oder Klumpenbildung kommen. Eine Kondenswasserbildung kann jedoch auch in geschlossenen Gebinden (z. B. Containern)

Sämtliche in diesem Dokument enthaltenen Erklärungen, Angaben und Daten sind unsere Wissens zutreffend und verlässlich, dürfen jedoch nicht als Garantie, ausdrückliche Gewährleistung oder implizite Gewährleistung der Mängelfreiheit oder Eignung für einen bestimmten Zweck oder als Zuzeichnung ausdrücklicher oder impliziter Art ausgelegt werden, für die Solenis und seine Tochtergesellschaften und verbundenen Unternehmen die rechtliche Haftung übernehmen. ™ Maria, Solenis oder seine Tochtergesellschaften oder verbundenen Unternehmen, in verschiedenen Ländern eingetragen. *Durch Dritte geschützt. © 2018, Solenis.

nicht komplett unterbunden werden. Die dabei eventuell entstandenen Klumpen lösen sich im Allgemeinen jedoch unter mechanischer Beanspruchung (z. B. Umpumpen) leicht wieder auf und beeinflussen die Qualität des Produktes nicht.

Nach längerer Lagerung kann das Produkt zum Schichten neigen. Nach der Homogenisierung durch intensives Rühren, Umpumpen oder Umwälzen durch Gaseinleitung (Stickstoff, Luft) ist das Produkt ohne Qualitätseinbußen verwendungsfähig.

Die Lagertemperatur soll langfristig nicht über 40°C liegen.

Wassergefährdungsklasse: WGK 2 wassergefährdend (Selbsteinstufung)

Beständigkeit bei vorschriftsmäßiger Lagerung

Emulsion in Originalverpackung:
mindestens 6 Monate

Stammlösung in Leitungswasser*:
mindestens 3 Tage

Gebrauchslösung in Leitungswasser*:
mindestens 1 Tag

*Krefelder Leitungswasser: ca. 12°dH; pH-Wert: ca. 8, Leitfähigkeit: ca. 500 µS/cm

Verpackung

Dieses Produkt ist in verschiedenen Gebindegrößen erhältlich. Ihr zuständiger Verkaufingenieur wird Sie hinsichtlich der für Ihre Anwendung geeigneten Gebindegröße beraten.

Wichtige Informationen

Typische Eigenschaften: siehe Sicherheitsdatenblatt.

Behördliche Informationen: Beachten Sie bitte das Sicherheitsdatenblatt oder setzen Sie sich mit Ihrem zuständigen Verkaufingenieur bezüglich zusätzlicher Vorschriften und umweltrelevanter Informationen in Verbindung.

Sicherheit: Jedes unserer Produkte wird mit einem Sicherheitsdatenblatt geliefert. Sicherheitsdatenblätter enthalten wichtige Informationen zur Arbeitssicherheit und zum Gesundheitsschutz, auf deren Grundlage unsere Kunden entsprechende Arbeitsanweisungen erstellen können, um ihre Mitarbeiter und Kunden gegen schädliche Auswirkungen beim Umgang mit den Stoffen zu schützen.

Vor Einsatz der Solenis-Produkte in Ihrer Anlage ist sicherzustellen, dass die Sicherheitsdatenblätter von Ihrem Aufsichtspersonal und Ihren zuständigen Mitarbeitern gelesen und verstanden wurden.



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

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

HGoTECH GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13
53115 Bonn

Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
 Analysenr. 861207
 Probeneingang 27.06.2023
 Probenahme 23.06.2023
 Kunden-Probenbezeichnung AL2

Einheit Ergebnis Substanz Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	10,7	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
----------------------	---	------	----	--	---

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Kupfer (Cu)	mg/kg	201	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
Zink (Zn)	mg/kg	418	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	5,26	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Blei (Pb)	mg/kg	15,3	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,35	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Chrom (Cr)	mg/kg	104	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Nickel (Ni)	mg/kg	835	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,11	OS		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)

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

Beginn der Prüfungen: 28.06.2023
 Ende der Prüfungen: 03.07.2023

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. Bei der Konformitätsbewertung wird als Entscheidungsregel der wirtschaftliche Ansatz angewendet (eine Nichtkonformität liegt vor, wenn das Messergebnis inklusive Messunsicherheit oberhalb der Spezifikation oder Norm liegt), soweit durch entsprechende gesetzliche oder normative Grundlagen nichts anderes festgelegt wurde.

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

AGROLAB LUFA GmbH

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



Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
Analysenr. 861207



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

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

AG Kiel
HRB 5796
Ust./VAT-ID-Nr:
DE 813 356 511

Geschäftsführer
Wiebke Puschmann
Dr. Stephanie Nagorny
Dr. Paul Wimmer
Dr. Torsten Zurmühl



Seite 2 von 2

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14082-01-00

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

HGoTECH GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13
53115 Bonn

Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
Analysenr. 861208
Probeneingang 27.06.2023
Probenahme 23.06.2023
Kunden-Probenbezeichnung AL3

Einheit Ergebnis Substanz Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	13,4	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
----------------------	---	------	----	--	--

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Kupfer (Cu)	mg/kg	231	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
Zink (Zn)	mg/kg	554	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	5,16	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Blei (Pb)	mg/kg	17,4	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,47	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Chrom (Cr)	mg/kg	94,5	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Nickel (Ni)	mg/kg	937	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,22	OS		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS		VDLUFA II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)

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

Beginn der Prüfungen: 28.06.2023

Ende der Prüfungen: 03.07.2023

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. Bei der Konformitätsbewertung wird als Entscheidungsregel der wirtschaftliche Ansatz angewendet (eine Nichtkonformität liegt vor, wenn das Messergebnis inklusive Messunsicherheit oberhalb der Spezifikation oder Norm liegt), soweit durch entsprechende gesetzliche oder normative Grundlagen nichts anderes festgelegt wurde.

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

AGROLAB LUFA GmbH

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



Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
Analysenr. 861208



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

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

DOC-12-18379746-DE-P4

AG Kiel
HRB 5796
Ust./VAT-ID-Nr:
DE 813 356 511

Geschäftsführer
Wiebke Puschmann
Dr. Stephanie Nagorny
Dr. Paul Wimmer
Dr. Torsten Zurmühl



Seite 2 von 2

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14082-01-00

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

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

HGoTECH GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13
53115 Bonn

Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag **3273601**
 Analysenr. **861209**
 Probeneingang **27.06.2023**
 Probenahme **23.06.2023**
 Kunden-Probenbezeichnung **AL4**

Einheit Ergebnis Substanz Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	13,8	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
----------------------	---	-------------	----	--	---

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Kupfer (Cu)	mg/kg	236	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
Zink (Zn)	mg/kg	422	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	4,08	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Blei (Pb)	mg/kg	12,4	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,30	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Chrom (Cr)	mg/kg	310	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Nickel (Ni)	mg/kg	731	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,35	OS		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)

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

Beginn der Prüfungen: 28.06.2023
 Ende der Prüfungen: 03.07.2023

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. Bei der Konformitätsbewertung wird als Entscheidungsregel der wirtschaftliche Ansatz angewendet (eine Nichtkonformität liegt vor, wenn das Messergebnis inklusive Messunsicherheit oberhalb der Spezifikation oder Norm liegt), soweit durch entsprechende gesetzliche oder normative Grundlagen nichts anderes festgelegt wurde.

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

AGROLAB LUFA GmbH

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



Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
Analysenr. 861209



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

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

DOC-12-18379746-DE-F8

AG Kiel
HRB 5796
Ust./VAT-ID-Nr:
DE 813 356 511

Geschäftsführer
Wiebke Puschmann
Dr. Stephanie Nagorny
Dr. Paul Wimmer
Dr. Torsten Zurmühl



Seite 2 von 2

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14082-01-00

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

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

HGoTECH GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13
53115 Bonn

Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
 Analysenr. 861210
 Probeneingang 27.06.2023
 Probenahme 23.06.2023
 Kunden-Probenbezeichnung AL5

Einheit Ergebnis Substanz Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	9,7	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
----------------------	---	-----	----	--	---

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Kupfer (Cu)	mg/kg	134	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
Zink (Zn)	mg/kg	248	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	6,64	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Blei (Pb)	mg/kg	10,6	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,27	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Chrom (Cr)	mg/kg	87,8	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Nickel (Ni)	mg/kg	451	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,067	OS		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)

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

Beginn der Prüfungen: 28.06.2023
 Ende der Prüfungen: 03.07.2023

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. Bei der Konformitätsbewertung wird als Entscheidungsregel der wirtschaftliche Ansatz angewendet (eine Nichtkonformität liegt vor, wenn das Messergebnis inklusive Messunsicherheit oberhalb der Spezifikation oder Norm liegt), soweit durch entsprechende gesetzliche oder normative Grundlagen nichts anderes festgelegt wurde.

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

AGROLAB LUFA GmbH

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



Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
Analysenr. 861210



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

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

DOC-12-18379746-DE-P8

AG Kiel
HRB 5796
Ust./VAT-ID-Nr:
DE 813 356 511

Geschäftsführer
Wiebke Puschmann
Dr. Stephanie Nagorny
Dr. Paul Wimmer
Dr. Torsten Zurmühl



Seite 2 von 2

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14082-01-00

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

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

HGoTECH GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13
53115 Bonn

Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
 Analysenr. 861211
 Probeneingang 27.06.2023
 Probenahme 23.06.2023
 Kunden-Probenbezeichnung AL6

Einheit Ergebnis Substanz Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	11,9	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
----------------------	---	------	----	--	---

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Kupfer (Cu)	mg/kg	383	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
Zink (Zn)	mg/kg	788	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	6,28	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Blei (Pb)	mg/kg	18,9	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,71	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Chrom (Cr)	mg/kg	335	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Nickel (Ni)	mg/kg	951	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,11	OS		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)

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

Beginn der Prüfungen: 28.06.2023
 Ende der Prüfungen: 04.07.2023

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. Bei der Konformitätsbewertung wird als Entscheidungsregel der wirtschaftliche Ansatz angewendet (eine Nichtkonformität liegt vor, wenn das Messergebnis inklusive Messunsicherheit oberhalb der Spezifikation oder Norm liegt), soweit durch entsprechende gesetzliche oder normative Grundlagen nichts anderes festgelegt wurde.

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

AGROLAB LUFA GmbH

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



Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
Analysennr. 861211



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

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

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

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

HGoTECH GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13
53115 Bonn

Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
 Analysenr. 861212
 Probeneingang 27.06.2023
 Probenahme 23.06.2023
 Kunden-Probenbezeichnung AL7

Einheit Ergebnis Substanz Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	12,7	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
----------------------	---	------	----	--	---

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Kupfer (Cu)	mg/kg	192	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
Zink (Zn)	mg/kg	378	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	7,54	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Blei (Pb)	mg/kg	12,0	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,32	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Chrom (Cr)	mg/kg	108	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Nickel (Ni)	mg/kg	924	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,076	OS		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)

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

Beginn der Prüfungen: 28.06.2023
 Ende der Prüfungen: 03.07.2023

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. Bei der Konformitätsbewertung wird als Entscheidungsregel der wirtschaftliche Ansatz angewendet (eine Nichtkonformität liegt vor, wenn das Messergebnis inklusive Messunsicherheit oberhalb der Spezifikation oder Norm liegt), soweit durch entsprechende gesetzliche oder normative Grundlagen nichts anderes festgelegt wurde.

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

AGROLAB LUFA GmbH

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



Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
Analysenr. 861212



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

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

DOC-12-18379746-DE-P12

AG Kiel
HRB 5796
Ust./VAT-ID-Nr:
DE 813 356 511

Geschäftsführer
Wiebke Puschmann
Dr. Stephanie Nagorny
Dr. Paul Wimmer
Dr. Torsten Zurmühl



Seite 2 von 2

Deutsche
Akkreditierungsstelle
D-PL-14082-01-00

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

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

HGoTECH GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13
53115 Bonn

Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
 Analysenr. 861213
 Probeneingang 27.06.2023
 Probenahme 23.06.2023
 Kunden-Probenbezeichnung AL8

Einheit Ergebnis Substanz Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	11,4	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
----------------------	---	------	----	--	---

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Kupfer (Cu)	mg/kg	480	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
Zink (Zn)	mg/kg	567	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	4,92	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Blei (Pb)	mg/kg	12,8	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,69	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Chrom (Cr)	mg/kg	398	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Nickel (Ni)	mg/kg	1140	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,094	OS		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)

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

Beginn der Prüfungen: 28.06.2023
 Ende der Prüfungen: 03.07.2023

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. Bei der Konformitätsbewertung wird als Entscheidungsregel der wirtschaftliche Ansatz angewendet (eine Nichtkonformität liegt vor, wenn das Messergebnis inklusive Messunsicherheit oberhalb der Spezifikation oder Norm liegt), soweit durch entsprechende gesetzliche oder normative Grundlagen nichts anderes festgelegt wurde.

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

AGROLAB LUFA GmbH

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



Datum 04.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273601
Analysenr. 861213



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

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

DOC-12-18379746-DE-P14

AG Kiel
HRB 5796
Ust./VAT-ID-Nr:
DE 813 356 511

Geschäftsführer
Wiebke Puschmann
Dr. Stephanie Nagorny
Dr. Paul Wimmer
Dr. Torsten Zurmühl



Seite 2 von 2

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

HGoTECH GmbH
Karlrobert-Kreiten-Str. 13
53115 Bonn

Datum 07.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag 3273608
Analysenr. 861218
Probeneingang 27.06.2023
Probenahme 23.06.2023
Kunden-Probenbezeichnung AL1

Einheit Ergebnis Substanz Methode

Wertbestimmende Bestandteile

Gesamtposphat (P2O5)	%	20,5	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
----------------------	---	------	----	--	---

Wertbestimmende Bestandteile, Spurennährstoffe

Kupfer (Cu)	mg/kg	65,3	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)
Zink (Zn)	mg/kg	576	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 11885: 2009-09 (mod.)

Spurennährstoffe / Schwermetalle

Arsen (As)	mg/kg	14,0	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Blei (Pb)	mg/kg	5,20	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Cadmium (Cd)	mg/kg	0,28	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Chrom (Cr)	mg/kg	18,0	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Nickel (Ni)	mg/kg	107	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)
Quecksilber (Hg)	mg/kg	0,19	OS		DIN EN 16320 : 2017-05
Thallium (Tl)	mg/kg	<0,10	OS		VDLUF II, 9.5.1 : 2004 & DIN EN ISO 17294-2 : 2017-01 (mod.)

Mikrobiologische Untersuchungen

Salmonellen	*)	in 50 g	nicht nachgewiesen	OS		Kapitel IV. C 1. Methodenbuch der BGK
Campylobacter jejuni/C. coli in 50g	*)		nicht nachgewiesen	OS		MP-01540-DE : 2022-07 (real-time PCR)
stx-Gene	*)		nicht nachgewiesen	OS		MP-01539-DE : 2022-12 (real-time PCR)
E. coli VTEC/STEC ÖkoV 50g	*)	in 50g	nicht nachgewiesen	OS		MP-01539-DE : 2022-12 (real-time PCR)
Listeria monocytogenes	*)	in 50g	nicht nachgewiesen	OS		RAPID' L.mono® (Nachweis); NordVal-Zertifikats-Nr.: NordVal 022: 2022-05 (validiert in Referenz zu EN ISO 11290-1 : 2017)

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

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.

Datum 07.07.2023
Kundennr. 10071448

PRÜFBERICHT

Auftrag **3273608**
Analysenr. **861218**

Anmerkung zum Parameter *Campylobacter* sp. PCR:

Die Methode weist die thermophilen *Campylobacter jejuni* und *Campylobacter coli* nach.

Anmerkung zum Parameter *E. coli* VTEC/STEC:

Es wurde keine Serogruppenbestimmung und keine Isolierung durchgeführt.

Beginn der Prüfungen: 28.06.2023

Ende der Prüfungen: 07.07.2023

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. Bei der Konformitätsbewertung wird als Entscheidungsregel der wirtschaftliche Ansatz angewendet (eine Nichtkonformität liegt vor, wenn das Messergebnis inklusive Messunsicherheit oberhalb der Spezifikation oder Norm liegt), soweit durch entsprechende gesetzliche oder normative Grundlagen nichts anderes festgelegt wurde.

Die in diesem Dokument berichteten Verfahren sind gemäß DIN EN ISO/IEC 17025:2018 akkreditiert. Ausschließlich nicht akkreditierte Verfahren sind mit dem Symbol "*" gekennzeichnet.




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