



Rheinland-Pfalz

MINISTERIUM FÜR
KLIMASCHUTZ, UMWELT,
ENERGIE UND MOBILITÄT

PHOSPHORFRAKTIONIERUNG: ABLEITUNG VON OPTIMIERUNGS- MASSNAHMEN ZUR PHOSPHORELIMINATION

Handlungsempfehlungen für kommunale Kläranlagen



Impressum

Herausgeber

Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz
Kaiser-Friedrich-Straße 1 • 55116 Mainz

www.mkuem.rlp.de

Bearbeitung:

Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung (rewa) an der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau

Cora Laumeyer

Oliver Gretzschel

Dr.-Ing. Henning Knerr

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

Bearbeitung Analyseanleitung:

Fachgebiet Ressourceneffiziente Abwasserbehandlung (rewa) an der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau

Dr.-Ing. Henning Knerr

Prof. Dr.-Ing. Heidrun Steinmetz

Layout: Landesamt für Umwelt

Titelbild: Kläranlage Edenkoben (© Martin Hanke, Verbandsgemeinde Edenkoben)

April 2024

© Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz 2024

Nachdruck und Wiedergabe nur mit Genehmigung des Herausgebers

INHALTSVERZEICHNIS

1	HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG	4
2	P-FRAKTIONIERUNG IM ABLAUF KOMMUNALER KLÄRANLAGEN ALS GRUNDLAGE DER ERMITTLUNG VON OPTIMIERUNGSMASSNAHMEN	7
2.1	Durchführung der Phosphorfractionierung	7
2.2	Ergebnisse der Phosphorfractionierung	9
2.3	Ableiten von Optimierungspotenzialen	14
3	ERGEBNISSE VON BEISPIELANLAGEN IN RHEINLAND-PFALZ	19
3.1	Fallbeispiel: Best Practice Kläranlage Elschbach	19
3.2	Fallbeispiel: Best Practice Kläranlage Trualb (Trulben)	22
3.3	Fallbeispiel: Erhöhter Anteil S_{PO_4-P} Kläranlage Erbachtal	25
3.4	Fallbeispiel: Erhöhter Anteil partikulären Phosphors und Ortho-Phosphat-Phosphors bei Regenwetterabfluss auf der Kläranlage Gemünden	27
4	ZUSAMMENFASSUNG	31
5	LITERATURVERZEICHNIS	32
6	BEGRIFFSERLÄUTERUNGEN	34

1 HINTERGRUND UND ZIELSETZUNG

In Rheinland-Pfalz (RLP) wird das anfallende Abwasser in 661 kommunalen Kläranlagen mit einer Gesamtausbaukapazität von etwa 7,2 Mio. Einwohnerwerten (E) behandelt. Die gezielte Phosphor (P)-Elimination erfolgt auf 61 % aller Anlagen bei einem Anteil an der Gesamtausbaukapazität von 95 %.

Trotz der bereits erreichten Erfolge in Hinsicht auf die Reduktion der Phosphoremissionen durch kommunale Kläranlagen wurde auf Grundlage des biologischen Monitorings und der chemischen Überwachung in den Gewässern in Rheinland-Pfalz ermittelt, dass in 53 % bzw. mit Oberliegern in 80 % der Wasserkörper die Einleitungen aus Punktquellen, insbesondere Kläranlagen, entscheidend mit dazu beitragen, dass der gute ökologische Zustand aufgrund der stofflichen Belastung im Einleitgewässer nicht erreicht wird (vgl. Abbildung 1).

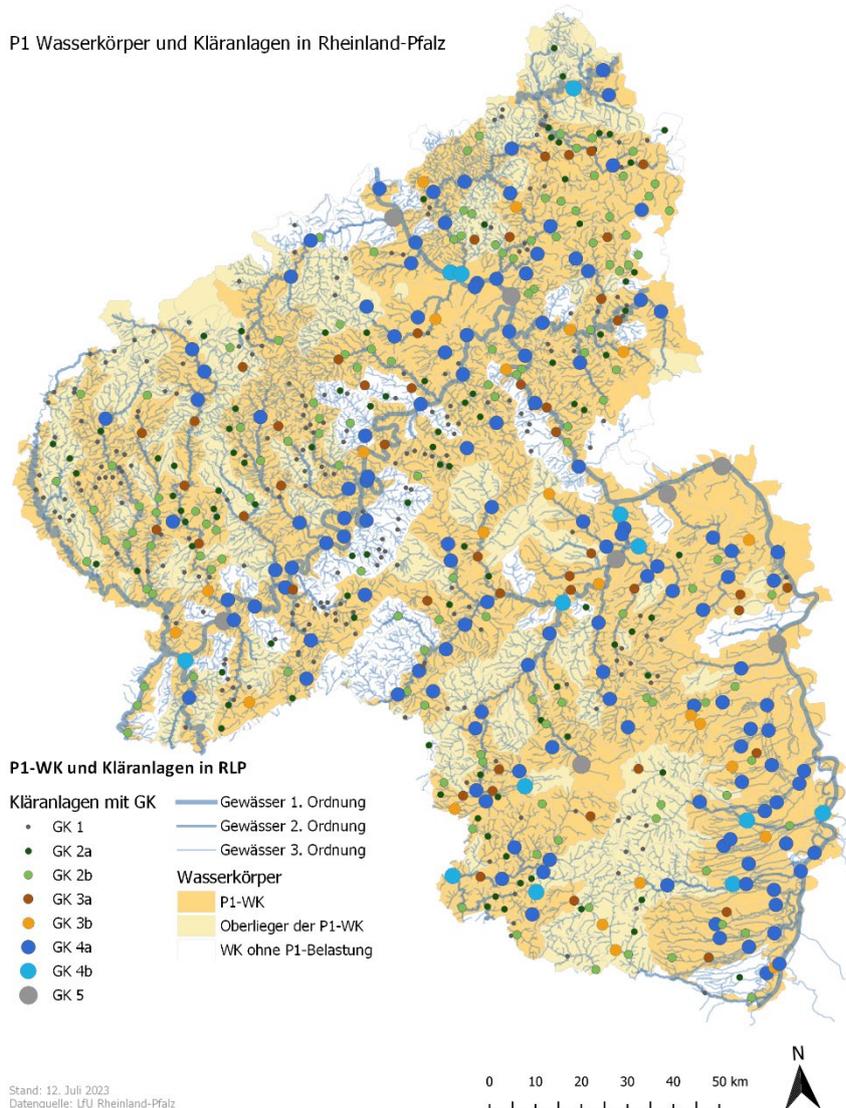


Abbildung 1: Übersicht der p1-Wasserkörper und der Kläranlagen in Rheinland-Pfalz

Die Kläranlagen an diesen sogenannten p1-Wasserkörpern und auch deren Oberliegern sollen durch den Einsatz von kosteneffizienten Optimierungs- und Modifizierungsmaßnahmen der Phosphor-Fällung bzw. der Feststoffabtrennung mindestens die in Tabelle 1 aufgeführten Mindestzielwerte für den P-Jahres-Betriebsmittelwert einhalten. Mit [Schreiben des MUEEF vom 10.01.2019](#) wurden die betroffenen Abwasserbeseitigungspflichtigen über diese neuen Mindestzielwerte informiert.

Zur Unterstützung bei Neubau- bzw. Optimierungsmaßnahmen zur P-Elimination wurde mit dem Schreiben eine zunächst zeitlich befristete zusätzliche Förderung aus Mitteln der Wasserwirtschaftsverwaltung Rheinland-Pfalz gegeben. Diese wird durch die seit dem Jahr 2022 maßgeblichen neuen [Förderrichtlinien](#) fortgeführt.

Neben der entgeltsabhängigen Regelförderung ergeben sich somit nachfolgende Möglichkeiten zur Gewährung von Boni, sofern Maßnahmen der Abwasserbeseitigung in besonderem Maße dazu beitragen, wasserwirtschaftliche Zielsetzungen zu erreichen. Die Höhe des möglichen WRRL-Bonus für Maßnahmen zur gezielten Phosphorelimination beträgt bis zu:

- 20 % Zuschuss für Fällung, Fällungsoptimierung
- 30 % Zuschuss für Flockungsfiltration

Der Fördersatz kann um weitere 10 % erhöht werden, wenn die von der Bewilligungsbehörde festgelegten Betriebs- bzw. Jahresmittelwerte durch die Maßnahme um mehr als 30 % unterschritten werden. Voraussetzung für die Gewährung der genannten Boni ist, dass die P-Fracht durch die Maßnahme um mindestens 20 % reduziert wird.

Bei Gewässern mit einem Mindestmaß eines gewässerbiologischen Entwicklungspotenzials und bei Kläranlagen, die aufgrund ihrer Ausbaugröße im Vergleich zu anderen Kläranlagen und ihrer Lage im Gewässer einen besonderen Einfluss auf die stoffliche P-Belastung haben, kann es sinnvoll sein, über die genannten Maßnahmen der Fällung und Fällungsoptimierung hinauszugehen und Verfahren zur weitergehenden Phosphorelimination (z. B. Filtration, Flockungsfiltration) einzurichten.

Ein wichtiger Bestandteil bei der Identifikation von Optimierungsmaßnahmen zur Reduktion der P-Emissionen ist die Kenntnis über die noch eliminierbaren (fällbaren, abtrennbaren) bzw. nicht eliminierbaren (nicht fällbaren) P-Bestandteile im Ablauf der Kläranlagen.

Zur Ermittlung der Potenziale und Grenzen der P-Elimination im Bestand wurden Kläranlagenbetreiber aufgerufen, im Rahmen eines Sondermessprogrammes die o. g. P-Fraktionen zu ermitteln. Die Erfassung und Übermittlung der Ergebnisse erfolgte mit der Selbstüberwachung für die Jahre 2020 und 2021. Zur Durchführung wurden Hilfestellungen, wie z. B. eine Analyseanleitung zur P-Fraktionierung zur Verfügung gestellt (siehe Abschnitt 2.1). Die Ergebnisse des Sondermessprogrammes werden in Abschnitt 2.2 dargestellt.

Tabelle 1: P-Mindestzielwerte für Kläranlagen an p1-Gewässern im Vergleich zu den nach AbwV (2004) geforderten Einleitkonzentrationen

Kläranlagen	Mindestzielwert*	Bescheidswert**	Anforderung nach Anhang 1 AbwV** (2004)
	C_P [mg/L]	C_P [mg/L]	C_P [mg/L]
Belebungsanlagen > 100.000 E Ausbaugröße	0,4	0,8 – 1,0	1,0
Belebungsanlagen > 10.000 bis 100.000 E Ausbaugröße	0,5	1,0 – 1,2	2,0
Belebungsanlagen > 5.000 bis 10.000 E Ausbaugröße	0,7	1,5	–
Belebungsanlagen 1.000 bis 5.000 E Ausbaugröße	0,7	2,0	–
Belebungsanlagen 500 bis < 1.000 E Ausbaugröße	1,0	keine Vorgaben	–
Tropfkörperanlagen 1.000 bis < 10.000 E Ausbaugröße	1,4	2,0	–
Belebungsanlagen > 10.000 E Ausbaugröße mit Flockungsfiltration oder Verfahren mit mindestens gleichwertiger Reinigungsleistung	0,15 – 0,2	0,3 – 0,4	–
* Jahresbetriebsmittelwert			
** qualifizierte Stichprobe (qStP) oder 2h-Mischprobe			

Ab Abschnitt 2.3 sind konkrete Hilfestellungen und Interpretationshinweise aufgeführt sowie die Ableitung von Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt. Für neun Beispielkläranlagen wurde eine Detailbetrachtung durchgeführt sowie unterschiedliche Randbedingungen und Optimierungsmöglichkeiten auf den Kläranlagen konkret betrachtet. Von diesen neun betrachteten Kläranlagen wurden die Daten von vier repräsentativen Anlagen ausgewertet und in Kapitel 3 aufgeführt.

Diese Handlungsempfehlung soll bei der Identifikation und der Umsetzung der durchführbaren Optimierungsmaßnahmen helfen. Sie richtet sich an Betreiber, Planer und Behörden und gibt wichtige Hinweise und Hilfestellungen.

2 P-FRAKTIONIERUNG IM ABLAUF KOMMUNALER KLÄRANLAGEN ALS GRUNDLAGE DER ERMITTLUNG VON OPTIMIERUNGSMASSNAHMEN

2.1 Durchführung der Phosphorfractionierung

Phosphor kann im Ablauf mechanisch-biologischer Kläranlagen in drei analytisch abgrenzbare Fraktionen unterschieden werden (vgl. Abbildung 2), welche auf unterschiedlicher Vorbehandlung der Probe und der anschließenden Reaktion mit Molybdat beruhen. Der Gesamt-Phosphor (C_P) kann dabei zunächst durch Filtration nach DIN EN ISO 6878 (2004) in den partikulären Phosphor (X_P) und den gelösten Phosphor (S_P) unterteilt werden. Die Fraktion des gelösten Phosphors setzt sich zudem aus Ortho-Phosphat-Phosphor (S_{PO_4-P}) und gelöstem nicht fällbarem Phosphor (S_{nfP}) zusammen, der verschiedene organische Phosphorverbindungen, v. a. Phosphonate beinhaltet.

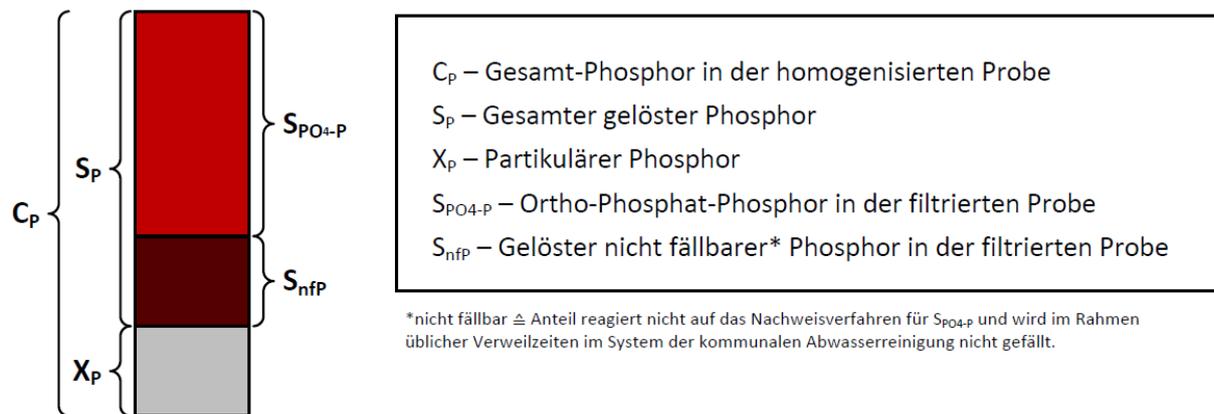


Abbildung 2: Phosphorfractionen im Kläranlagenablauf, farbliche Kennung entspricht der farblichen Kennung in den nachfolgenden Diagrammen zur Phosphorfractionierung.

Wie in der Analyseanleitung (Knerr & Steinmetz, 2020) dargestellt ist, kann in Anlehnung an DIN EN ISO 6878 (2004) folgende Massenbilanz für die Phosphorfractionen im Ablauf kommunaler Kläranlagen erstellt werden:

$$C_P = X_P + S_P = X_P + S_{PO_4-P} + S_{nfP} \quad \text{(Gleichung 1)}$$

Das Verfahren der Analytik des Phosphors nach DIN EN ISO 6878 (2004) in wässrigen Medien beruht prinzipiell auf der Messung von Orthophosphat und der Berechnung des Phosphoranteils am Orthophosphat.

Zur Bestimmung des Gesamt-Phosphorgehalts ist daher der oxidative Aufschluss der Gesamtabwasserprobe und dabei die Überführung der nicht Orthophosphat-Verbindungen in gelöstes Orthophosphat erforderlich.

In Abhängigkeit von der Vorbehandlung der Probe (Filtration und/oder Oxidationsaufschluss) können damit die o. g. Phosphor-Fractionen direkt oder indirekt (vgl. Tabelle 2) bzw. entsprechend den Gleichungen 2 und 3 bestimmt werden.

Tabelle 2: Bezeichnung und Beschreibung der Abkürzungen der Phosphorfractionen

Abkürzung	Bezeichnung	Beschreibung der Bestimmung
C _P	Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe als P (ATV-DVWK 2003).	Direkte Bestimmung des Gesamt-Phosphor nach DIN EN ISO 6878 (2004) in der homogenisierten Probe mit Hitze- und Oxidationsaufschluss
S _P	Konzentration des Phosphors in der filtrierten Probe (Filter mit Porenweite 0,45 µm) als P	Direkte Bestimmung des Gesamt-Phosphor nach DIN EN ISO 6878 (2004) in der filtrierten Probe mit Hitze- und Oxidationsaufschluss
S _{PO4-P}	Konzentration des Ortho-Phosphat-Phosphors in der filtrierten Probe als P	Direkte Bestimmung des Ortho-Phosphat-Phosphor nach DIN EN ISO 6878 (2004) ohne Oxidationsaufschluss aus der filtrierten Probe
X _P	Konzentration des partikulären Phosphors als P	Indirekte Bestimmung aus der Differenz zwischen dem Gesamt-Phosphor (C _P) und dem gesamten gelösten Phosphor (S _P)
S _{nfP}	Konzentration des gelösten (unter den Bedingungen, die auf der Kläranlage üblicherweise vorherrschenden) nicht fällbaren Phosphors in der filtrierten Probe als P	Indirekte Bestimmung aus der Differenz zwischen dem gesamten gelösten Phosphor (S _P) und dem gelösten Orthophosphat-Phosphor (S _{PO4-P})

Es ist anzumerken, dass die DIN EN ISO 6878 (2004) keine Bezeichnungen für die Differenzterme definiert.

Die einzelnen Schritte der Phosphorfractionierung sind im Folgenden beschrieben und in Abbildung 3 dargestellt:

- Schritt 1: **Probenahme** als **qualifizierte Stichprobe, 2 h- oder 24 h-Mischprobe** des Kläranlagenablaufs
- Schritt 2: **Probenvorbereitung** – Homogenisierung der Probe und Aufteilung in zwei Proben (I + II)
- Schritt 3: **Analyse** des Gesamt-Phosphorgehalts aus der **homogenisierten** Probe (I) mittels Oxidationsaufschluss → **C_P**
- Schritt 4: **Membranfiltration** (Porenweite 0,45 µm) der Probe (II) und Aufteilung des Filtrats in zwei gleiche Teilproben (III + IV)
 - Schritt 4.1: Analyse des Gesamt-Phosphorgehalts aus der filtrierten Teilprobe (III) mittels Oxidationsaufschluss → **S_P**
 - Schritt 4.2: Analyse des **Ortho-Phosphat-Phosphorgehalts** der **filtrierten Teilprobe** (IV) ohne Oxidationsaufschluss → **S_{PO4-P}**
- Schritt 5: **Berechnung** der Fraktionen **S_{nfP}** und **X_P** entsprechend den Gleichungen 2 und 3

$$\mathbf{X_P = C_P - S_P} \quad \mathbf{(Gleichung\ 2)}$$

$$\mathbf{S_{nfP} = S_P - S_{PO4-P}} \quad \mathbf{(Gleichung\ 3)}$$

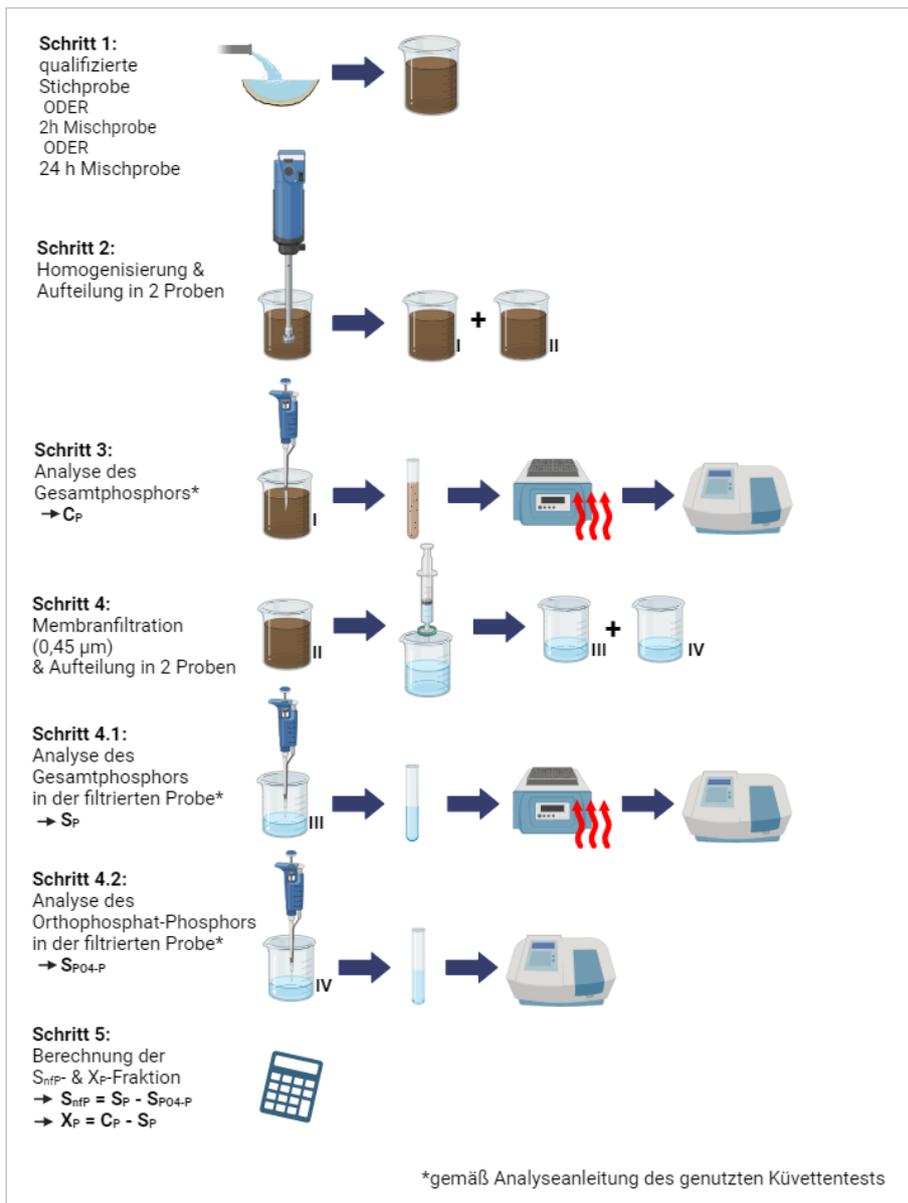


Abbildung 3: Ablauf der Phosphorfraktionierung im Kläranlagenablauf unter Nutzung von Küvettestenschnelltests. Grafik erstellt in BioRender.com

Es ist davon auszugehen, dass zwischen den verschiedenen Phosphorfraktionen ein dynamisches Gleichgewicht besteht. Die verschiedenen Phosphorfraktionen einer Probe können sich durch verschiedene physikalische, chemische und biologische Prozesse umwandeln (Jarvie et al., 2002). Aus diesem Grund sollten die P-Fraktionen grundsätzlich aus der qualifizierten Stichprobe analysiert werden, die Analyse einer frischen 2 h- bzw. 24 h-Mischprobe ist ebenfalls möglich.

Die Ermittlung der P-Fraktionen ist entsprechend der Analyseanleitung durchzuführen, die [hier](#) oder über den nebenstehenden QR-Code abgerufen werden kann.



2.2 Ergebnisse der Phosphorfraktionierung

Datengrundlage

Nach Sichtung der eingegangenen Datensätze und Bereinigung fehlerhafter Datensätze lagen von den 412 Kläranlagen, für die Mindestzielwerte gemäß Tabelle 1 festgelegt sind, auswertbare Ergebnisse von 48 Kläranlagen vor. Zusätzlich wurden Detailmessprogramme zur Phosphorfraktionierung an weiteren neun Kläranlagen durchgeführt, sodass insgesamt 57 Datensätze in die Auswertung eingeflossen sind. Die absolute und prozentuale Beteiligung in den einzelnen Größenklassen (GK) sind in Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Teilnahme der rheinland-pfälzischen Kläranlagen mit gezielter P-Elimination an der P-Fraktionierung nach Größenklassen

Größen- klasse	Ausbaugröße [E]	Angefragte Kläranlagen [-]	Teilnahme P-Fraktionierung	
			Anzahl [-]	Anteil [%]
1	500 bis 999	35	1	2,9
2a	1.000 bis 2.000	67	7	10,4
2b	2.001 bis 5.000	99	10	10,1
3a	5.001 bis 8.000	40	5	12,5
3b	8.001 bis 10.000	24	2	8,3
4a	10.001 bis 50.000	127	12	9,4
4b	50.001 bis 100.000	13	5	38,5
5	> 100.000	7	6	85,7
		Σ 412	Σ 57	–

Damit liegt für alle Größenklassen bis auf die Größenklasse 1 eine akzeptable Anzahl an Messergebnissen zur Auswertung vor.

Datenauswertung

Die Ergebnisse der P-Fraktionierung werden in den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen für die Größenklassen 2 bis 5 (n = 56) mit den Mindestzielwerten als Vergleichsgröße dargestellt und je Phosphor-Fraktion diskutiert.

Bei den Ergebnissen handelt es sich um Mittelwerte der vorliegenden Messwerte (im Wesentlichen aus qualifizierten Stichproben), wobei keine Unterscheidung nach Probennahme bei Trocken- oder Regenwetterabfluss vorgenommen wurde.

Eine zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse wird in Abbildung 4, differenziert nach Kläranlagen-Größenklasse gegeben. Die Anzahl der der Auswertung zugrundeliegenden Messwerte (je Kläranlage) variiert mit 2 bis 29 Messwerten stark und ist über dem jeweiligen Balken der einzelnen Kläranlagen aufgeführt.

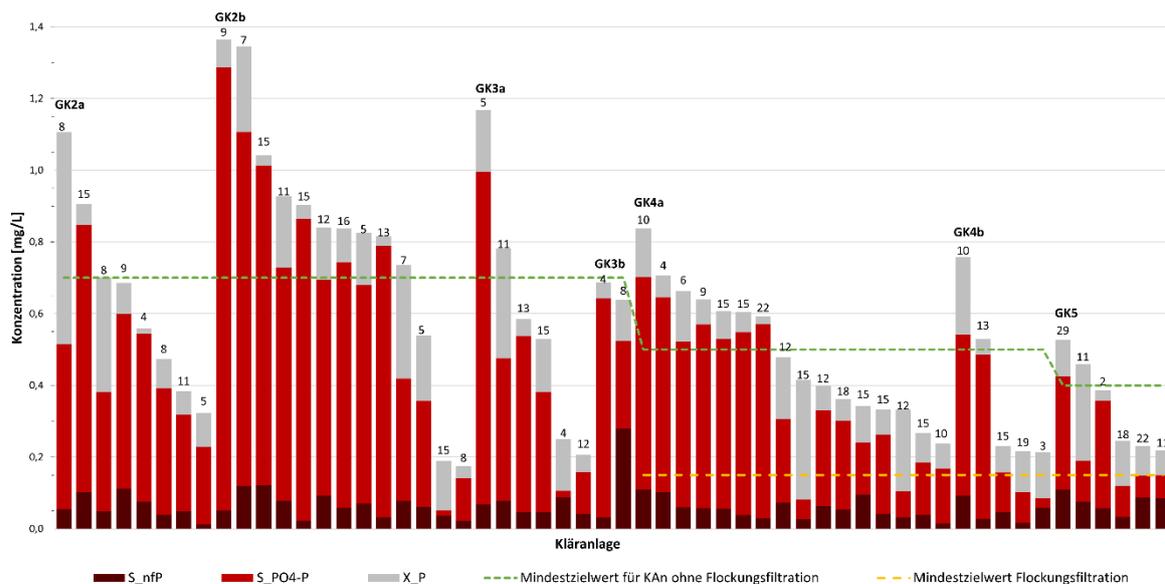


Abbildung 4: Ergebnisse der Phosphorfractionierung sortiert nach Kläranlagen-Größenklasse mit Mindestzielwerten gemäß Tabelle 1

Gesamtphosphor C_P

Tabelle 4: Ergebnisse C_P – Mittelwert

GK	C_P – Mittelwert (qualifizierte Stichprobe, 2h-Mischprobe, Stichprobe)	Kläranlagen mit Unterschreitung	
	[mg/L]	Anzahl [-]	Anteil [%]
2 und 3	> 0,7*	16	55,2
	0,5 – 0,7	6	20,7
	0,3 – 0,49	5	17,2
	≤ 0,29	2	6,9
4	> 0,5*	9	42,9
	0,3 – 0,5	7	33,3
	0,15** – 0,29	5	23,8
	≤ 0,149	0	0
5	> 0,4*	2	33,3
	0,3 – 0,4	1	16,7
	0,15** – 0,29	3	50,0
	≤ 0,149	0	0,0

* Mindestzielwerte für Kläranlagen ohne Flockungsfiltration (FF) gemäß Tabelle 1

** Mindestzielwerte für Kläranlagen mit FF gemäß Tabelle 1

Es ist erkennbar, dass die gemessenen C_P -Ablaufkonzentrationen der Kläranlagen bei den meisten Kläranlagen (n = 29) bereits unterhalb von den Größenklassen abhängig definierten Mindestzielwerte liegen.

Dies ist auch in Abbildung 4 erkennbar. Der in der Grafik dargestellte Mindestzielwert der Flockungsfiltration wird in manchen Fällen fast erreicht, jedoch erwartungsgemäß bei keiner Kläranlage unterschritten, da bisher noch kein Verfahren zur weitestgehenden P-Elimination in RLP umgesetzt wurde. Die Daten zeigen aber auch bei fast der Hälfte der Kläranlagen ($n = 27$ bzw. 47 %) eine Überschreitung des vorgegebenen Mindestzielwertes (ohne Flockungsfiltration). Dabei ist hervorzuheben, dass dies nicht einzelne Größenklassen betrifft, sondern in allen betrachteten Größenklassen auftritt. Da die Kläranlagen der Größenklasse 1 aufgrund der mangelnden Datengrundlage hier nicht betrachtet wurden, ist davon auszugehen, dass auch hier ein großes Reduktionspotenzial vorhanden ist. Es besteht folglich ein erhebliches Potenzial zur Reduktion der P-Emissionen in Kläranlagen aller Größenklassen.

Außerdem wird deutlich, dass der Phosphor im Ablauf der meisten Kläranlagen erwartungsgemäß hauptsächlich in Form von fällbarem Ortho-Phosphat-Phosphor vorliegt. Bei einigen Kläranlagen ist die partikuläre und damit abtrennbare Phosphorfraktion im Ablauf erhöht und ist in wenigen Fällen sogar die größte Fraktion.

Ortho-Phosphat-Phosphor S_{PO_4-P}

Tabelle 5: Ergebnisse Fraktionierung S_{PO_4-P} – Mittelwert

GK	S_{PO_4-P} – Mittelwert (qualifizierte Stichprobe, 2h-Mischprobe, Stichprobe)	Kläranlagen mit Unterschreitung	
	[mg/L]	Anzahl [-]	Anteil [%]
2 und 3	> 0,16	25	86,2
	0,1 – 0,16	2	6,9
	0,05 – 0,09	0	0,0
	≤ 0,049	2	6,9
4	> 0,16	13	61,9
	0,1 – 0,16	4	19,0
	0,05 – 0,09	3	14,3
	≤ 0,049	1	4,8
5	> 0,16	2	33,3
	0,1 – 0,16	1	16,7
	0,05 – 0,09	3	50,0
	≤ 0,049	0	0,0

In Anlehnung an die Regelung für Kläranlagen in Baden-Württemberg, die verschärfte Anforderungen an die Phosphorelimination erfüllen müssen und sich für die sogenannte *Fällungsvariante* entscheiden, werden die für diesen Fall zusätzlich geltenden Anforderungen an die Ortho-Phosphat-Phosphor-Ablaufkonzentration von 0,16 mg/L S_{PO_4-P} (Ministerium für Umwelt, Klima und Baden-Württemberg 2023) als Referenzwert für eine erreichbare Ablaufkonzentration genutzt.

Dieser Wert von 0,16 mg/L S_{PO_4-P} wurde im Rahmen der Phosphorfractionierung von 16 Kläranlagen unterschritten. Es ist auffällig, dass die S_{PO_4-P} -Konzentration in über 85 % der Kläranlagen der Größenklasse 2 und 3 sowie in 61 % der Kläranlagen der Größenklasse 4 und 33 % der Kläranlagen der Größenklasse 5 eine Konzentration von $\geq 0,16$ mg/L S_{PO_4-P} aufweist, wie in Tabelle 5 erkennbar. Dies weist auf ein deutliches Reduzierungspotenzial des Ortho-Phosphat-Phosphors durch betriebliche Optimierungsmaßnahmen der Fällung hin.

Partikulärer Phosphor X_P

Die Ergebnisauswertung zeigt, dass 30 der 56 Kläranlagen (54 %) einen X_P -Mittelwert von 0,1 mg/L unterschreitet, während 26 Kläranlagen (46 %) diese Konzentration im Ablauf überschreiten. Dabei betreffen die Unter- bzw. Überschreitungen des Mittelwertes von 0,1 mg/L X_P gleichermaßen die Kläranlagen der Größenklasse 2 bis 5. Im Minimum zeigten die Mittelwerte der 56 Kläranlagen eine X_P -Konzentration von 0,015 mg/L X_P und im Maximum 0,59 mg/L X_P .

Korrespondierend wurden zu den P-Fractionen der Gehalt an abfiltrierbaren Stoffe X_{AFS} im Ablauf der Kläranlagen gemessen, um zu überprüfen ob es einen Zusammenhang zu X_P gibt.

Eine Korrelation konnte nicht festgestellt werden, so dass aus den vorliegenden Untersuchungen von dem AFS-Gehalt keine Rückschlüsse auf die X_P -Fraktion gezogen werden können.

Gelöster, nicht fällbarer Phosphor S_{nFP}

Tabelle 6: Ergebnisse Fraktionierung S_{nFP} – Mittelwert

GK	S_{nFP} – Mittelwert (qualifizierte Stichprobe, 2h-Mischprobe, Stichprobe)	Kläranlagen mit Unterschreitung	
	[mg/L]	Anzahl [-]	Anteil [%]
2 und 3	$\geq 0,1$	5	17,2
	0,051 – 0,09	12	41,4
	$\leq 0,05$	12	41,4
4	$\geq 0,1$	2	9,5
	0,051 – 0,09	9	42,9
	$\leq 0,05$	10	47,6
5	$\geq 0,1$	1	16,7
	0,051 – 0,09	4	66,7
	$\leq 0,05$	1	16,7

Die S_{nFP} -Fraktion liegt bei ca. 41 % Prozent der Kläranlagen der Größenklasse 2 bis 5 unterhalb des Mittelwertes vergleichbarer Studien 0,05 mg/L S_{nFP} (Böhler & Siegrist, 2008; Rott et al., 2016; Fundneider et al., 2019). Bei einer der betrachteten Kläranlagen errechnet sich der S_{nFP} zu 0,38 mg/L S_{nFP} , was einen deutlich erhöhten Wert darstellt. Die Ursache für diesen auffällig hohen Wert konnte nicht identifiziert werden.

Bei Kläranlagen mit einer S_{nfP} -Konzentration von ca. 0,10 mg/L S_{nfP} kann die Einhaltung des derzeitigen Mindestzielwertes der Flockungsfiltration von 0,15 mg/L C_{P} deutlich erschwert sein. Folglich ist es insbesondere für die Betreiber dieser Kläranlagen von Interesse die Ursachen der erhöhten S_{nfP} -Konzentrationen in Erfahrung zu bringen. Zudem ist ein Gespräch mit den Behörden anzustreben, um ggf. Ausnahmeregelungen abzustimmen.

Die Annahme, dass mit steigender Ausbaugröße der Kläranlage und der Zunahme des Anteils der gewerblich-industriellen Indirekteinleiter erhöhte S_{nfP} -Anteile einhergehen, konnte im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen nicht bestätigt werden.

2.3 Ableiten von Optimierungspotenzialen

Nach erfolgter P-Fraktionierung des Kläranlagenablaufs erlauben die Ergebnisse eine Identifizierung der möglichen Optimierungspotenziale. Dazu werden die Anteile der einzelnen Fraktionen am Gesamtposphor miteinander verglichen und Handlungsoptionen abgeleitet. In Abbildung 5 ist ein Schema zur Interpretation der Ergebnisse der Phosphorfraktionierung dargestellt.

Die Priorisierung der Maßnahmen zur Reduktion der Phosphoremissionen sollte nach dem Aufwand, der zur Umsetzung der Maßnahme erforderlich ist erfolgen. Betriebliche Optimierungen zur Steigerung der Fällungsreaktion, wie etwa die Dosierstrategie, Zugabe oder Einmischung des Fällmittels, sind folglich baulichen Veränderungen, wie etwa einem Umbau des Einlaufbauwerks der Nachklärung zur Verbesserung der Feststoffrückhaltung, vorzuziehen. Darüber hinaus ist bei baulichen Veränderungen die Betrachtung eventueller Synergieeffekte im Hinblick auf weitere, zukünftige Reinigungsziele (bspw. Spurenstoffelimination) zu bedenken.

Konkrete Optimierungsmaßnahmen sind im Weiteren ohne Anspruch auf Vollständigkeit dargestellt.

1. $S_{\text{PO4-P}} > 0,16 \text{ mg/L}$ oder $S_{\text{PO4-P}} > X_{\text{P}}$

Mögliche Ursachen:

Die möglichen Ursachen eines erhöhten Ortho-Phosphat-Phosphorgehaltes im Ablauf der Nachklärung reichen von einer ungenügenden Fällmitteldosierung, über eine unzureichend turbulente Einmischung des Fällmittels bis hin zum verwendeten Fällmittel selbst. Um die Ursache zu identifizieren und eine Lösung für das spezifische Problem zu finden, sollten folgende Punkte überprüft werden:

1. der β -Wert,
2. das Fällmittel,
3. die Dosierstrategie (Konstant, nach Ganglinie, Steuerung, Regelung),
4. die Dosierstelle und Einmischung

Anbei einige Beispiele:

1. Der $S_{\text{PO}_4\text{-P}}$ -Gehalt ist $> 0,16 \text{ mg/L}$ **oder** $S_{\text{PO}_4\text{-P}} > X_{\text{P}}$ und **β -Wert ist $< 1,2$** . In diesem Fall ist die dosierte Fällmittelmenge wahrscheinlich nicht ausreichend. Dies kann bspw. daran liegen, dass sich die Zulaufsituation verändert hat und die erforderliche Fällmittelmenge nicht an die geänderte Belastungssituation angepasst wurde. Zudem kann mit einem β -Wert von 1,2 erfahrungsgemäß ein C_{P} -Überwachungswert von lediglich 1,0 mg/L sicher eingehalten werden (DWA, 2011). Für niedrigere C_{P} -Konzentrationen müssen höhere β -Werte angewendet werden. So sind im Fall einer nachgeschalteten Flockungsfiltration oder Nachfällung β -Werte von mindestens 2,5 anzusetzen (DWA, 2011). Höhere β -Werte sind damit begründet, dass das stöchiometrische Verhältnis zwischen den zugegebenen kationischen Fällmitteln und der zu reduzierenden $S_{\text{PO}_4\text{-P}}$ -Konzentration ab einer Konzentration von 0,5 mg/L $S_{\text{PO}_4\text{-P}}$ aufgrund der zunehmenden Bildung von Metallhydroxiden nicht mehr gültig ist (Fundneider et al., 2019; Bratby, 2016; Hahn, 1982).
2. Der $S_{\text{PO}_4\text{-P}}$ -Gehalt ist $> 0,16 \text{ mg/L}$ **oder** $S_{\text{PO}_4\text{-P}} > X_{\text{P}}$ und ein **Fällmittel mit geänderter Zusammensetzung** wird eingesetzt, dessen anteilige Wirkstoffmenge nicht mit der vorherigen übereinstimmt. In diesem Fall ist eine Berechnung der benötigten Fällmittelmenge mit den aktualisierten Daten des Fällmittels durchzuführen, um die gewünschte Reduktion der $S_{\text{PO}_4\text{-P}}$ -Konzentration zu erreichen. In diesem Zuge sollte ebenfalls der β -Wert überprüft werden, wie in 1. beschrieben.
Kläranlagen, die aufgrund von weichem Wasser eine geringe Säurekapazität aufweisen, haben meist weniger Spielraum und sollten vor einem Wechsel des Fällmittels oder einer Erhöhung des β -Werte, zunächst den Einfluss des Fällmittels auf die Säurekapazität im Rahmen von Becherglas-Versuchen überprüfen. Dies ist erforderlich, um ein Absinken des pH-Wertes und dadurch einen negativen Einfluss auf die Biologie ausschließen zu können. In diesem Fall sollte auf die Verwendung alkalischer Aluminiumverbindungen oder die Kombination von Kalkhydrat und sauren Salzen zurückgegriffen werden (DWA, 2011).
3. Der $S_{\text{PO}_4\text{-P}}$ -Gehalt ist $> 0,16 \text{ mg/L}$ **oder** $S_{\text{PO}_4\text{-P}} > X_{\text{P}}$ und das **Fällmittel wird konstant (24/7) dosiert**. Dann kann es sein, dass die Spitzen im Tagesgang der Belastung nicht abgedeckt werden. Im einfachsten Fall wäre dann eine Erhöhung der zu dosierenden Fällmittelmenge durchzuführen. Idealerweise mit unterschiedlichen Tages- und Nachtdosiermengen, um den Fällmittelverbrauch zu minimieren. Besser wäre eine Änderung der Dosierstrategie, bis hin zur vollständigen Automatisierung.
4. Der $S_{\text{PO}_4\text{-P}}$ -Gehalt ist $> 0,16 \text{ mg/L}$ **oder** $S_{\text{PO}_4\text{-P}} > X_{\text{P}}$ und die **Dosierung des Fällmittels erfolgt in einem wenig turbulenten Bereich**. In einer Kläranlage lassen sich in der Regel genügend Stellen finden, an denen Fällmittel mit hoher Turbulenz und energieintensiv zu dosiert werden können. Das sind bspw. Venturirinnen, im Zulauf zum Belebungsbecken oder die Rezirkulationsleitung. Liegt die Dosierstelle nicht an einer turbulenten Stelle, sollte eine Verlegung geprüft werden. Falls eine Verlegung der Dosierstelle aufgrund der räumlichen Gegebenheiten nicht möglich ist und die Dosierung infolge der vorhandenen Randbedingungen an einer ungünstigen Stelle punktuell erfolgt, sollte geprüft werden, ob das Fällmittel über eine größere Strecke dosiert werden kann, wie bspw. über einen Teil der Belebungsbeckenbreite oder die gesamte Breite eines Gerinnes.

2. Hauptbestandteil X_P

Mögliche Ursache:

Erhöhte X_P -Gehalte im Ablauf der Nachklärung weisen auf den Abtrieb partikulär gebundenen Phosphors aus der Nachklärung hin. Folglich sind sowohl die Absetzeigenschaften des Schlammes in der Nachklärung (Schlammindex ISV), die Schlammvolumenbeschickung der Nachklärung (q_{SV}) als auch die Nachklärung auf ihre hydraulische Belastung zu prüfen.

Mögliche Lösung:

Um die Ursache zu identifizieren und eine Lösung für das spezifische Problem zu finden, sollten folgende Punkte überprüft werden:

1. der Schlammindex (ISV),
2. die Schlammvolumenbeschickung der Nachklärung (q_{SV}),
3. die hydraulischen Bedingungen anhand einer numerischen Simulation.

Anbei einige Beispiele:

1. Der X_P -Gehalt ist $\geq S_{PO_4-P}$ und der **Schlammindex $> 120 \text{ mL/g}$** . In diesem Fall kann die Eindickfähigkeit des Schlammes, bspw. durch die Nutzung von Mischprodukten für die Phosphatfällung erhöht werden. Diese können gemäß DWA A 202 (2011) zum Einsatz kommen, um eine Verbesserung der Flockenbildung, eine Bekämpfung von Blähschlamm und eine Reduzierung von Schwimmschlamm zu erreichen. Ebenso können Flockungshilfsmittel in Form von Polymeren eingesetzt werden.
2. Der X_P -Gehalt ist $\geq S_{PO_4-P}$ und die **Schlammvolumenbeschickung der Nachklärung (q_{SV}) ist $\geq 500 \text{ L/(m}^2/\text{h)}$** . In diesem Fall kann es aufgrund eines geringen Abstands des Schlammspiegels bis zum Klarwasserabzug zu Schlammabtrieb kommen (DWA, 2016).

Es können folgende Parameter überprüft werden:

- a) Kontrolle der Sichttiefe: Ist der Abstand zwischen Schlamm Spiegel und Ablauf nicht ausreichend, kann es zu einer Sogwirkung und dadurch zu Schlammabtrieb kommen. Auch Schlamm aufwirbelungen am Beckenrand können zu Schlammabtrieb führen.
 - b) Berechnung des Vergleichsschlammvolumens (VSV): $TS_{AB} \cdot ISV$ in L/m^3 . Falls die biologische Behandlungsstufe mit einem höheren TS_{BB} -Gehalt als bemessen betrieben wird, ergibt sich ggf. eine zu hohe Schlammvolumenbeschickung q_{SV} .
 - c) Iterative Ermittlung der Schlammvolumenbeschickung (q_{SV}), bis die rechnerische Tiefe mit der tatsächlichen Tiefe des Bauwerkes übereinstimmt (DWA, 2016). Berechnet sich der q_{SV} aufgrund eines höheren TS_{BB} -Gehaltes zu $\geq 500 \text{ L/(m}^2/\text{h)}$, deutet dies auf einen sehr hohen Schlamm Spiegel mit ggf. massiven Schlammabtrieb hin. In diesem Fall ist zu prüfen, inwiefern die Schlammvolumenbeschickung gesenkt werden kann, um den Schlammabtrieb zu verhindern.
3. Der X_P -Gehalt ist $\geq S_{PO_4-P}$ und die zuvor genannten Punkte ergeben keinen Lösungsansatz. In diesem Fall wird eine numerische Strömungssimulation empfohlen, um die Leistungsfähigkeit der Nachklärung und mögliche Optimierungsmaßnahmen abzuleiten (DWA, 2016).

3. $S_{\text{nfP}} > 0,1 \text{ mg/L}$

Mögliche Ursache:

Erhöhte S_{nfP} -Gehalte $> 0,1 \text{ mg/L}$ im Ablauf der Nachklärung weisen auf einen hohen Gehalt organischer Phosphate hin, die mit der zurzeit in der kommunalen Abwasserreinigung verwendeten Verfahrenstechnik zur P-Elimination kaum weiter reduziert werden können. Aus diesem Grund stellt die Fraktion die theoretische erreichbare untere Grenze der Phosphorkonzentration im Ablauf einer kommunalen Kläranlage bei üblichen hydraulischen Verweilzeiten des Abwassers in den Kläranlagen dar. Die Verbesserungsmaßnahmen, die durch eine betriebliche Optimierung erzielt werden können, zielen wie zuvor beschrieben, auf die fällbare Ortho-Phosphat-Phosphor-Fraktion und die abtrennbare partikuläre P-Fraktion ab. Nach derzeitigem Kenntnisstand können S_{nfP} -Gehalte $> 0,1 \text{ mg/L}$ durch betriebliche Maßnahmen nicht weiter reduziert werden und es müssen quellenorientierte Maßnahmen (bspw. Identifizierung von Einleitern hoher Frachten organischer Phosphate) ergriffen werden.

In diesem Fall sollte eine Rücksprache mit der verantwortlichen Struktur- und Genehmigungsdirektion (SGD) erfolgen und potenziell relevante Indirekteinleiter identifiziert werden.

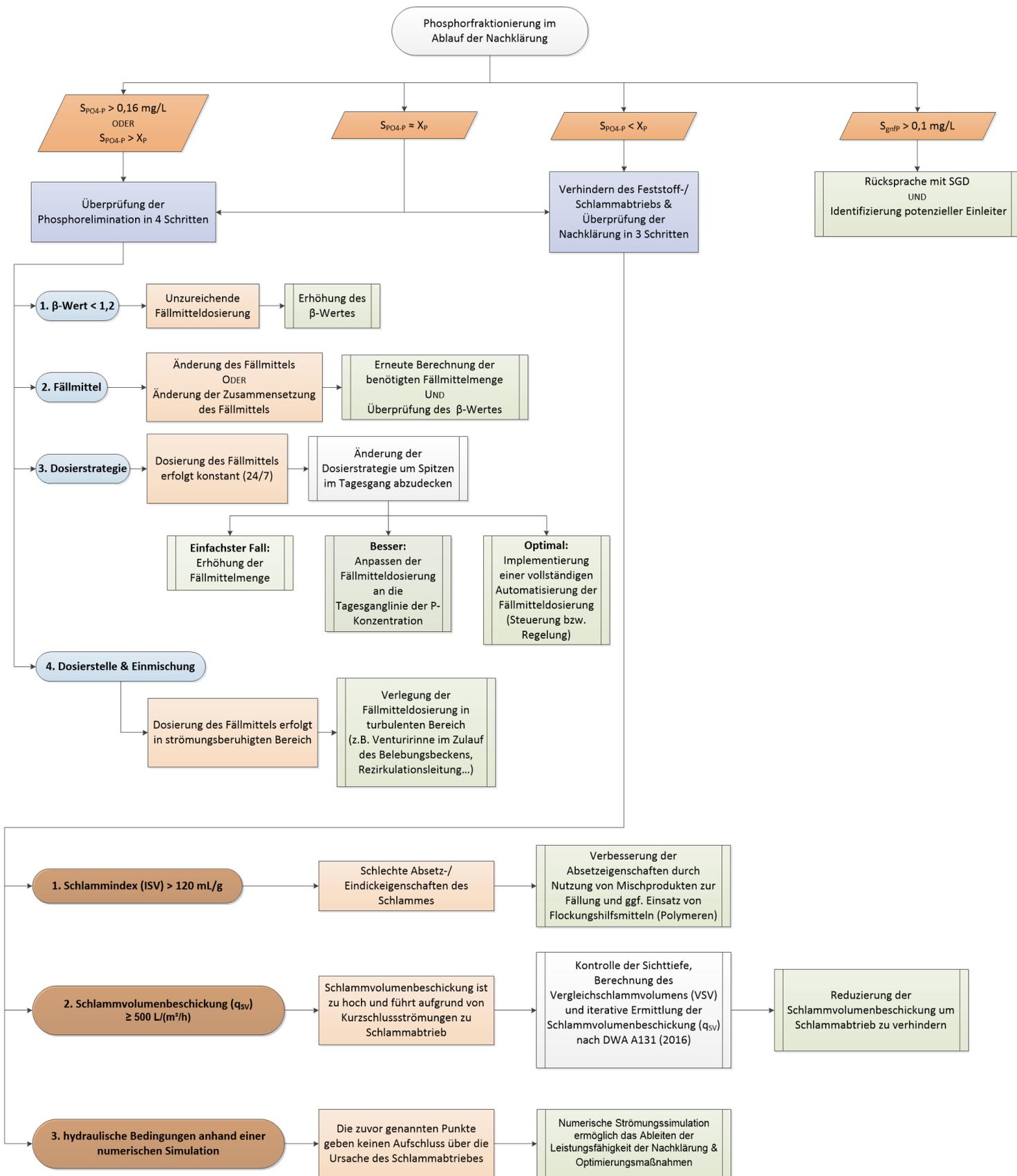


Abbildung 5: Schema zur Interpretation der Ergebnisse der Phosphorfractionierung

3 ERGEBNISSE VON BEISPIELANLAGEN IN RHEINLAND-PFALZ

Anhand von vier Beispielkläranlagen werden die Ergebnisse der P-Fraktionierung sowie deren Bewertung in Form von Steckbriefen dargestellt.

Die Auswahl der Anlagen erfolgte in Abstimmung mit dem Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie und Mobilität Rheinland-Pfalz (MKUEM) sowie dem Landesamt für Umwelt (LfU) Rheinland-Pfalz. Zur Auswahl der Anlagen wurden folgende Kriterien im Hinblick auf den Parameter Phosphor angewendet: Beobachtung großer Schwankungen in den Ablaufkonzentrationen, hohe Konzentrationen bei Trockenwetterabfluss, hohe Konzentrationen bei Regenwetterabfluss bzw. hohe Frachten bei Regenwetterabfluss. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse der Beispielanlagen Kläranlagenbetreibern eine Einordnung der eigenen Ergebnisse in Bezug auf die Phosphorfraktionierung im Ablauf der Nachklärung ermöglichen und eine Identifizierung der Optimierungspotenziale erleichtern. Hierzu erfolgte einerseits die Auswahl zweier Best Practice Anlagen, die mit der derzeitigen Phosphorelimination sehr gute Ablaufwerte erzielen. Andererseits zeigen zwei weitere Beispiele Kläranlagen, die den geforderten Betriebsmittelwert (Mindestzielwert nach Tabelle 1) sicher unterschreiten, aber dennoch ein erkennbares Optimierungspotenzial in Bezug auf die Reduktion des Ortho-Phosphat-Phosphors bzw. des partikulären Phosphors aufzeigen.

Nachfolgend sind die vier Kläranlagen in Form von Steckbriefen beschrieben und die Ergebnisse der Messprogramme sowie deren Bewertung zusammenfassend dargestellt.

3.1 Fallbeispiel: Best Practice Kläranlage Elschbach

Allgemeine Angaben	
Name und Betreiber	KA Elschbach (VG Oberes Glantal)
Anschlussgröße	13.400 E
GK	4a
Ablaufanforderungen	Betriebsmittelwert: $\leq 0,5 \text{ mg/L } C_P$ (Bescheidswert: $\leq 1,0 \text{ mg/L } C_P$)
Art der Fällung	Simultanfällung als 2-Punkt-Fällung
Fällmittel	Eisen-III-Chlorid (40 %)
β-Wert	3,5
Dossierstrategie	Konstante Fällmitteldosierung in den Zulauf des Belebungsbeckens. Wenn ein S_{PO_4-P} -Sollwert im Ablauf des Belebungsbeckens überschritten wird, erfolgt eine zweite Fällmitteldosierung im Zulauf zur Nachklärung.
Beschreibung	Die Fällmitteldosierung im Zulauf des Belebungsbeckens erfolgt konstant und eine zweite Fällmittelpumpe im Ablauf des Belebungsbeckens nimmt den Betrieb auf, wenn die online Messung im Ablauf des Belebungsbeckens (MS_{PO_4-P}) den vorgegebenen Sollwert von $0,2 \text{ mg/L } S_{PO_4-P}$ überschreitet.

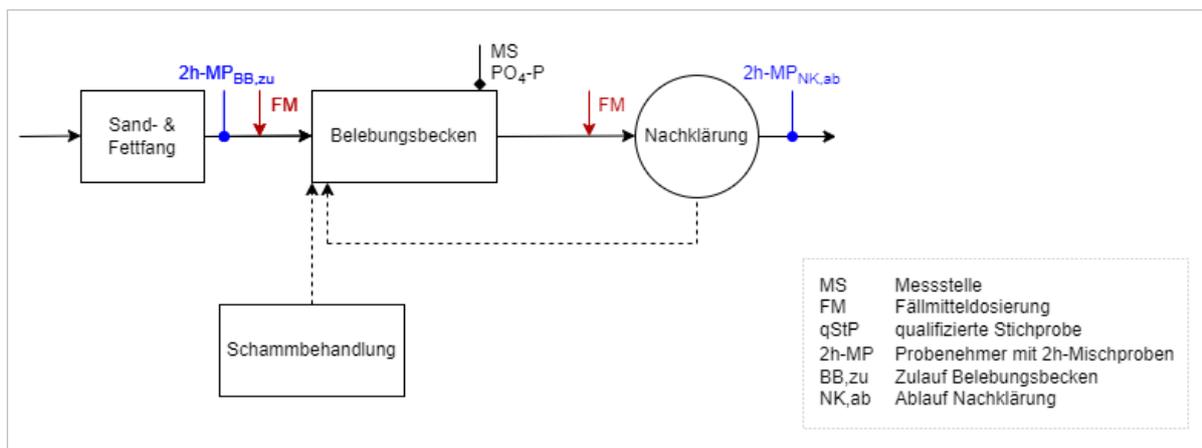


Abbildung 6: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Kläranlage Elschbach

Ergebnisse des Messprogramms	
Zeitraum der Messungen	November 2021 bis März 2022
Art der Proben	qualifizierte Stichproben
Kurzbewertung zur Einhaltung des Betriebsmittelwertes während des Messprogrammes	Der Betriebsmittelwert wurde bis auf eine Messung deutlich unterschritten. Im Mittel ergab sich eine C_P -Konzentration von 0,33 mg/L C_P . Der Überwachungswert wurde in keiner Probe überschritten.
Ortho-Phosphat-Phosphor	Der Phosphor liegt im Ablauf hauptsächlich in Form von Ortho-Phosphat-Phosphor und weist für den Zeitraum des Messprogramms einen Mittelwert von 0,22 mg/L \pm 0,05 mg/L auf. Folglich liegt der Hauptteil des Phosphors im Ablauf der Kläranlage fällbar vor ($\emptyset > 67\%$ der C_P -Konzentration).
Partikulärer Phosphor	Die partikuläre Fraktion (X_P) weist mit 0,07 mg/L \pm 0,02 mg/L nur einen geringen Anteil im Ablauf auf ($\emptyset 21\%$ der C_P -Konzentration). Regenwetter hat keinen signifikanten Einfluss auf die Zusammensetzung des Gesamtphosphors. Eine erhöhte hydraulische Belastung infolge Mischwasserzuflusses führt nicht zu Schlammabtrieb.
Gelöster nicht fällbarer Phosphor	Die Fraktion des gelösten nicht fällbaren Phosphors (S_{nfp}) schwankt im Ablauf zwischen 0,00 und 0,125 mg/L und weist für den Zeitraum des Messprogramms einen Mittelwert von 0,043 mg/L \pm 0,040 mg/L auf. Der ermittelte Wert liegt unterhalb des Literaturmittelwertes von 0,05 mg/L (Böhler & Siegrist, 2008; Rott et al., 2016; Fundneider et al., 2019).
Kläranlagenspezifisches theoretisches Limit der Phosphorelimination	Als theoretisches Limit der Phosphorelimination auf der KA Elschbach konnte im Zeitraum des Messprogramms eine S_{nfp} -Konzentration bei Trockenwetterabfluss von $\emptyset 0,044 \pm 0,038$ mg/L berechnet werden. Ein Maximalwert von 0,125 mg/L S_{nfp} wurde bei Regenwetterbedingungen erfasst.

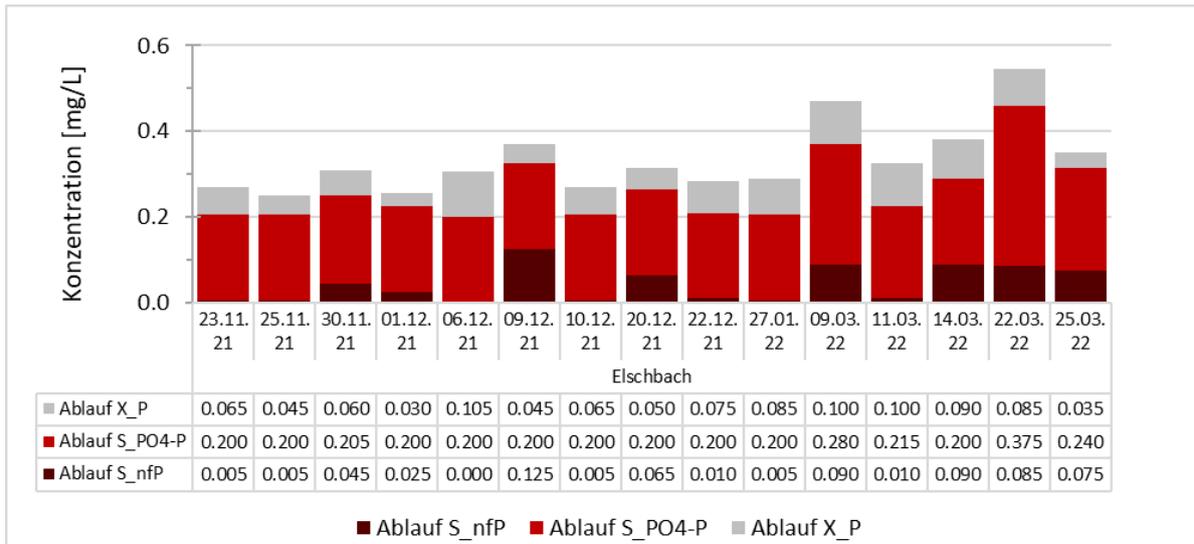


Abbildung 7: Ergebnisse der Messkampagne auf der KA Elschbach

Bewertung und Optimierungsmaßnahmen	
Kurzbewertung zur Einhaltung des Betriebsmittelwertes	Der Betriebsmittelwert (BMW) der Eigenüberwachung liegt bei 0,31 mg/L C _P (in 2020) bzw. 0,32 mg/L C _P (in 2021) und unterschreitet den für diese Größenklasse vorgegebenen Mindestzielwert von 0,5 mg/L C _P deutlich. Trotz der bereits geringen Ablaufkonzentration besteht Optimierungspotenzial, da der Hauptbestandteil im Ablauf als Ortho-Phosphat-Phosphor vorliegt.
Optimierungspotenzial und Umsetzungsvorschlag	<p>S_{PO4-P} > 0,16 mg/L: Es liegt Optimierungspotenzial zur Senkung der Ortho-Phosphat-Phosphor-Ablaufkonzentration vor.</p> <p>Entsprechend Abschnitt 2.3 bestehen verschiedene Ansätze zur Reduzierung des Ortho-Phosphat-Phosphors. Gemäß den Angaben ist der β-Wert im Vergleich zu den im A 202 genannten Werten hoch (DWA, 2011).</p> <p>Die Turbulenz an der ersten Dosierstelle im Zulauf zum Belebungsbecken (Venturirinne) ist ausreichend hoch und gewährleistet eine schnelle Einmischung in das Abwasser. Im Fall der zweiten Dosierstelle, welche sich innerhalb des Belebungsbeckens befindet, könnte die Einmischung durch ein Verlegen der Dosierstelle an einen Ort mit höherer Turbulenz verbessert werden. Außerdem kann der Sollwert zur Steuerung der zweiten Fällmittelzugabe von 0,2 mg/L S_{PO4-P} auf einen niedrigeren Wert herabgesetzt werden, sodass ein geringerer Ortho-Phosphat-Phosphor im Ablauf der Nachklärung erzielt wird.</p>

3.2 Fallbeispiel: Best Practice Kläranlage Trualb (Trulben)

Allgemeine Angaben	
Name und Betreiber	KA Trualb (VG Pirmasens-Land)
Anschlussgröße	4.000 E
GK	2b
Ablaufanforderungen	Betriebsmittelwert: $\leq 0,7 \text{ mg/L } C_P$ (Bescheidswert: $\leq 2,0 \text{ mg/L } C_P$)
Art der Fällung	Simultanfällung
Fällmittel	Brenntafloc AB (Natriumaluminat)
β -Wert	3,0
Dosierstrategie	Steuerung der Fällmitteldosierung nach dem Abwasserzufluss. Diese ist seit 2013 eingestellt.
Beschreibung	Zur Zeit des Messprogrammes erfolgt die Fällmitteldosierung anhand einer voreingestellten Tagesganglinie des Abwasserzulaufs. In Zukunft ist eine Steuerung anhand der im Zulauf zur Nachklärung befindlichen Ortho-Phosphat-Phosphor online Messung (MS $\text{PO}_4\text{-P}$) möglich.

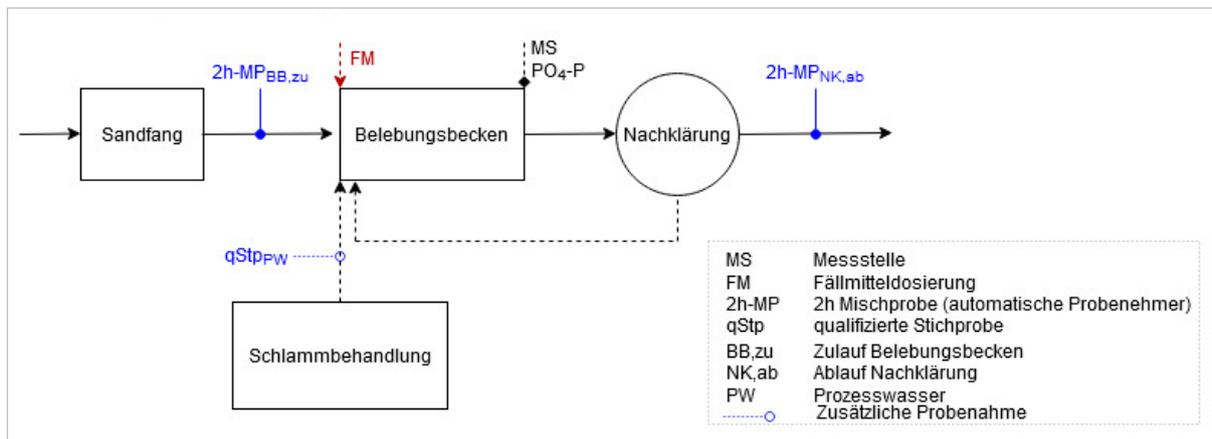


Abbildung 8: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Kläranlage Trualb

Ergebnisse des Messprogramms	
Zeitraum der Messungen	November 2021 bis Dezember 2021
Art der Proben	2h-Mischproben
Kurzbewertung zur Einhaltung des Betriebsmittelwertes während des Messprogrammes	Im Mittel ergab sich eine C_P -Konzentration von $0,19 \text{ mg/L } C_P$. Der Überwachungswert wurde in keiner Probe überschritten.
Ortho-Phosphat-Phosphor	Fällbarer Ortho-Phosphat-Phosphor nimmt mit $0,02 \pm 0,04 \text{ mg/L}$, im Ablauf nur einen geringen Anteil der Gesamt-Phosphorkonzentration ein ($\emptyset 8 \%$).

Ergebnisse des Messprogramms

Partikulärer Phosphor	Die partikuläre Fraktion (X_P) repräsentiert mit durchschnittlich $0,14 \pm 0,08$ mg/L den Hauptanteil des Phosphors im Ablauf der KA Tualb (\varnothing 72 %). Im Messprogramm stieg der Anteil des X_P am Gesamtphosphor bei Regenwetterabfluss weiter an (\varnothing 81 %). Eine erhöhte hydraulische Belastung der KA Tualb führt bei Regenereignissen zu Schlammabtrieb.
Gelöster nicht fällbarer Phosphor	Die Fraktion des gelösten nicht fällbaren Phosphors (S_{nfP}) schwankt im Ablauf der KA Tualb zwischen $0,02 - 0,123$ mg/L und betrug während des Messprogrammes im Mittel $0,037 \pm 0,025$ mg/L, was unterhalb des derzeitigen Literaturmittlerwertes von $0,05$ mg/L liegt (Böhler & Siegrist, 2008; Rott et al., 2016; Fundneider et al., 2019).
Kläranslagenspezifisches theoretisches Limit der Phosphorelimination	Als theoretisches Limit der Phosphorelimination konnte im Zeitraum des Messprogrammes eine S_{nfP} -Konzentration im Trockenwetterfall von \varnothing $0,041 \pm 0,029$ mg/L berechnet werden. Ein Maximalwert von $0,048$ mg/L S_{nfP} wurde bei Regenwetter erfasst.

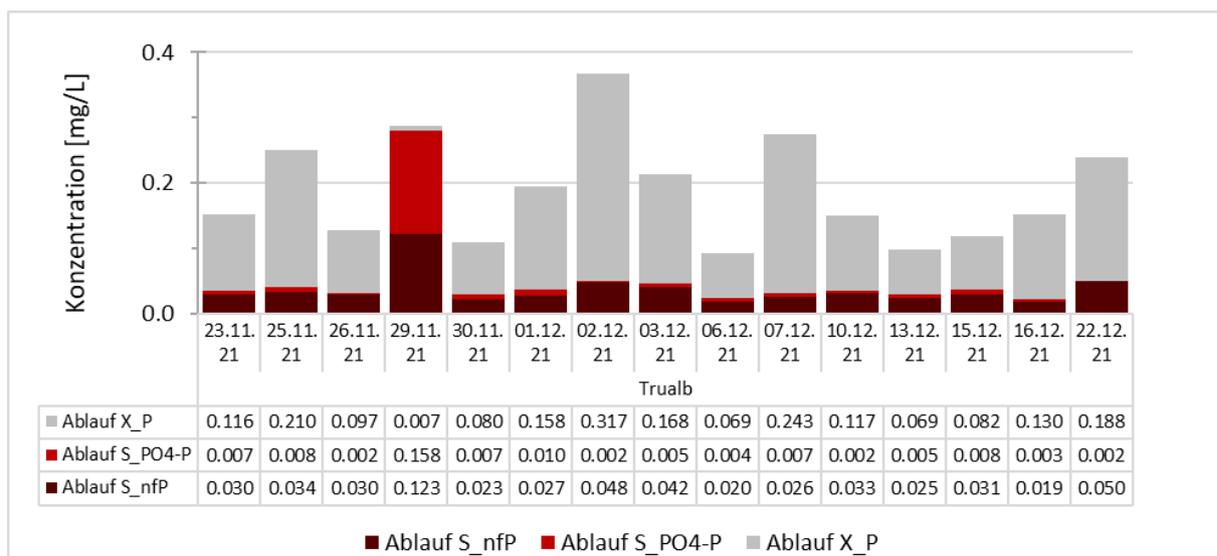


Abbildung 9: Ergebnisse der Messkampagne auf der KA Tualb

Bewertung und Optimierungsmaßnahmen	
Kurzbewertung zur Einhaltung des Betriebsmittelwertes	Der Betriebsmittelwert (BMW) liegt bei 0,3 mg/L C_P (in 2020) und somit deutlich unter dem für diese Größenklasse vorgegebenen Mindestzielwert von 0,7 mg/L C_P .
Optimierungspotenzial und Umsetzungsvorschlag	<p>$X_P > S_{PO_4-P}$: Es liegen Optimierungspotenziale zur weiteren Senkung der Phosphor-Ablaufkonzentration vor allem durch eine Verringerung des partikulären Phosphors vor.</p> <p>Entsprechend Kapitel 2.3 bestehen verschiedene Ansätze zur Reduzierung des partikulären Phosphors. Im Fall der Beispielkläranlage wurden die folgenden Ansatzpunkte bereits mit dem Betreiber diskutiert:</p> <ul style="list-style-type: none"> → Das Nachklärbecken hat eine Tiefe von 5 m. Der Anstieg des Schlammspiegels durch Verlagerung von Belebtschlamm in die Nachklärung bei Regenwetterabfluss führt zu keinem Schlammabtrieb. → Der ISV wird wöchentlich überprüft und ist unauffällig. → Eine Verbesserung der Schlammeigenschaften ist trotzdem möglich, da aufgrund des weichen Wassers Natriumaluminat eingesetzt wird. Anhand von Becherglas-Versuchen kann die Eignung eines Mischproduktes oder der Einsatz von Polymeren getestet werden. → Ergänzend können Maßnahmen zur Fällmitteleinsparung durch Einbinden des vorhandenen S_{PO_4-P}-online-Messung im Ablauf des Belebungsbeckens als Steuer-/Regelgröße für eine bedarfsorientierte Fällmitteldosierung und bspw. durch direkte Dosierung in die Einlaufstelle des Rücklaufschlammstromes ergriffen werden. → turbulenterer Einmischung des Fällmittels

3.3 Fallbeispiel: Erhöhter Anteil S_{PO_4-P} Kläranlage Erbachtal

Allgemeine Angaben	
Name und Betreiber	KA Erbachtal (VG Wallmerod)
Anschlussgröße	2.500 E
GK	2b
Ablaufanforderungen	Betriebsmittelwert: $\leq 0,7 \text{ mg/L } C_P$ (Bescheidswert: $\leq 2,0 \text{ mg/L } C_P$)
Art der Fällung	Simultanfällung
Fällmittel	Mischprodukt Aluminium- & Eisen-III-Chlorid
β -Wert	3,0
Dosierstrategie	Konstante Fällmitteldosierung in das Belebungsbecken, deren Menge nach Bedarf händisch angepasst wird.
Beschreibung	Die Fällmitteldosierung erfolgt derzeit mit konstanter Menge in das Belebungsbecken. Eine händische Anpassung der Fällmittelmenge erfolgt in Abhängigkeit der S_{PO_4-P} -Konzentration im Ablauf der Nachklärung. Zukünftig ist eine frachtabhängige Regelung nach S_{PO_4-P} -online Messung im Ablauf des Belebungsbeckens (MS PO_4-P) und Abwassermenge vorgesehen.

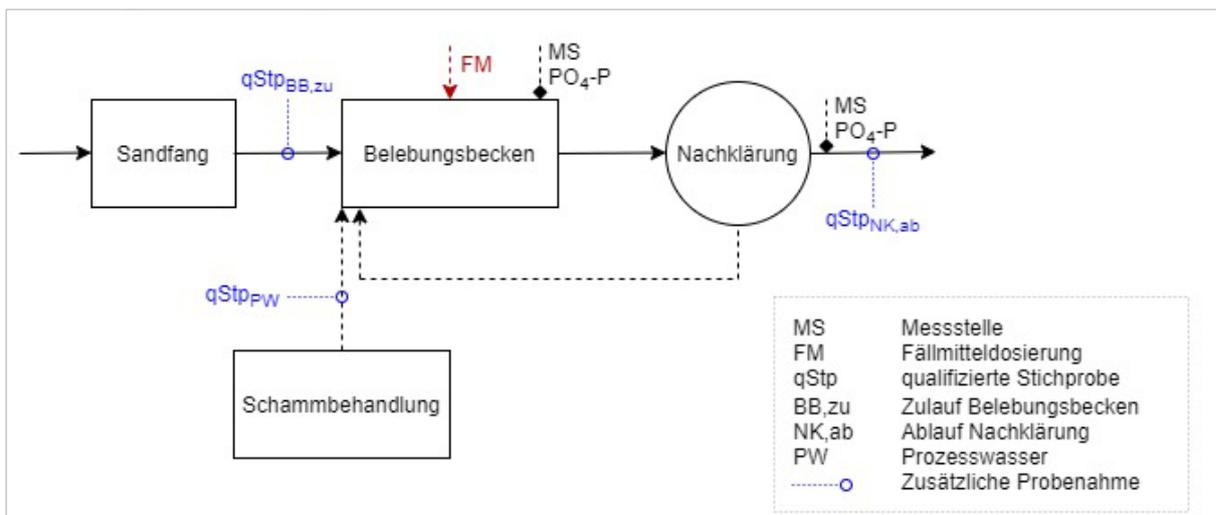


Abbildung 10: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Kläranlage Erbachtal

Ergebnisse des Messprogramms	
Zeitraum der Messungen	Januar bis April 2022
Art der Proben	qualifizierte Stichproben
Kurzbewertung zur Einhaltung des Betriebsmittelwertes während des Messprogrammes	Im Mittel ergab sich eine C_P -Konzentration von $0,9 \text{ mg/L } C_P$. Der Mindestzielwert wurde während des Messprogrammes an einem Großteil der Trockenwettertage nicht eingehalten (6/10). Bei Mischwasserzufluss wird der BMW deutlich unterschritten. Dies ist wahrscheinlich auf Verdünnungseffekte zurückzuführen.

Ergebnisse des Messprogramms	
Ortho-Phosphat-Phosphor	Der Phosphor im Ablauf der KA Erbachtal liegt mit $0,84 \pm 0,51$ mg/L, hauptsächlich in Form von Ortho-Phosphat-Phosphor und damit fällbar vor (\varnothing 90 % der C_P -Konzentration).
Partikulärer Phosphor	Die partikuläre Fraktion (X_P) ist mit einem Durchschnitt von $0,04 \pm 0,03$ mg/L weniger präsent und Regenwetterabfluss scheint keinen signifikanten Einfluss auf die Zusammensetzung des Gesamtphosphors zu nehmen. Dies deutet darauf hin, dass eine erhöhte hydraulische Belastung der Kläranlage bei Regenereignissen nicht zu Schlammabtrieb führt.
Gelöster nicht fällbarer Phosphor	Die Fraktion des gelösten nicht fällbaren Phosphors (S_{nfP}) schwankt im Ablauf zwischen $0,00 - 0,07$ mg/L und betrug während des Messprogrammes im Mittel $0,023 \pm 0,017$ mg/L, was unterhalb des derzeitigen Literaturmittelwertes von $0,05$ mg/L liegt (Böhler & Siegrist, 2008; Rott et al., 2016; Fundneider et al., 2019).
Kläranlagenspezifisches theoretisches Limit der Phosphorelimination	Als theoretisches Limit der Phosphorelimination konnte im Zeitraum des Messprogrammes eine S_{nfP} -Konzentration im Trockenwetterfall von $\varnothing 0,026 \pm 0,020$ mg/L berechnet werden. Ein Maximalwert von $0,07$ mg/L S_{nfP} wurde bei Trockenwetter erfasst.

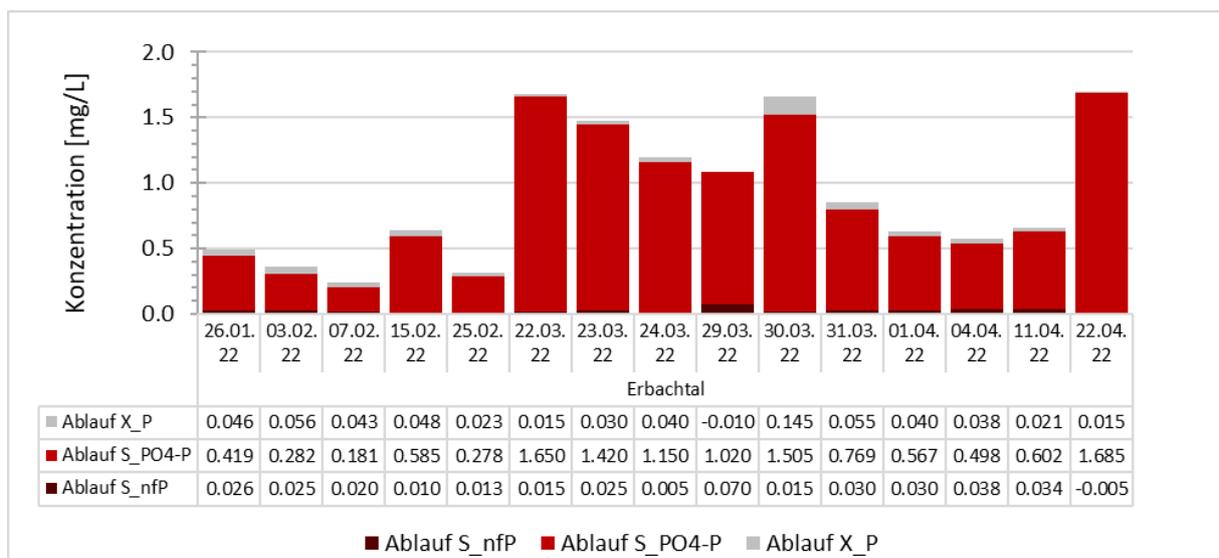


Abbildung 11: Ergebnisse der Messkampagne auf der KA Erbachtal

Bewertung und Optimierungsmaßnahmen	
Kurzbewertung zur Einhaltung des Betriebsmittelwertes	<ul style="list-style-type: none"> ■ Während des Messprogrammes lag der Mittelwert der C_P-Konzentration mit $0,9$ mg/L C_P oberhalb des geforderten Betriebsmittelwertes (BMW) von $0,7$ mg/L für diese GK. ■ Laut dem Betriebstagebuch lag der BMW in 2020 bei $0,52$ mg/L C_P und unterschreitet somit den für diese GK vorgegebenen Mindestzielwert von $0,7$ mg/L C_P.

Bewertung und Optimierungsmaßnahmen

Optimierungspotenzial und Umsetzungsvorschlag	<p>S_{PO4-P} > 0,16: Es liegen Optimierungspotenziale zur Senkung der Ortho-Phosphat-Phosphor-Ablaufkonzentration vor.</p> <p>Entsprechend Abschnitt 2.3 bestehen verschiedene Ansätze zur Reduzierung des Ortho-Phosphat-Phosphors. Gemäß den Angaben des Betreibers ist der vorhandene β-Wert mit 3,0 bereits sehr hoch.</p> <p>Ein deutliches Optimierungspotenzial zur weiteren Senkung der Phosphor-Ablaufkonzentration ergab sich durch eine Betrachtung der Dosierstelle – die Fällmitteldosierung erfolgte an einer ungünstigen Stelle mit unzureichender Turbulenz.</p> <p>→ Optimierung der S_{PO4-P}-Fällung durch Dosierung in turbulente Strömung → bspw. Dosierung an der Stelle der Einleitung der internen Rezirkulation.</p> <p>→ Einbinden der Messstellen im Ablauf des Belebungsbeckens sowie im Ablauf der Nachklärung → Implementieren einer Steuerung und/oder Regelung der Fällmittelzugabe.</p>
--	---

3.4 Fallbeispiel: Erhöhter Anteil partikulären Phosphors und Ortho-Phosphat-Phosphors bei Regenwetterabfluss auf der Kläranlage Gemünden

Allgemeine Angaben	
Name und Betreiber	KA Gemünden (VG Kirchberg)
Anschlussgröße	7.000 E
GK	3a
Ablaufanforderungen	Betriebsmittelwert: $\leq 0,7$ mg/L C _P (Bescheidswert: $\leq 1,5$ mg/L C _P)
Art der Fällung	Simultanfällung
Fällmittel	Natriumaluminat
β-Wert	Keine Angabe
Dosierstrategie	Keine Steuerung der Fällmitteldosierung, fest eingestellte Dosiermenge in den Zulaufschacht der zweistraßigen Belebung
Beschreibung	Automatische Probenahme im Ablauf der Nachklärung; nach Laboranalyse wird eine evtl. Anpassung der Fällmitteldosierung manuell vorgenommen.

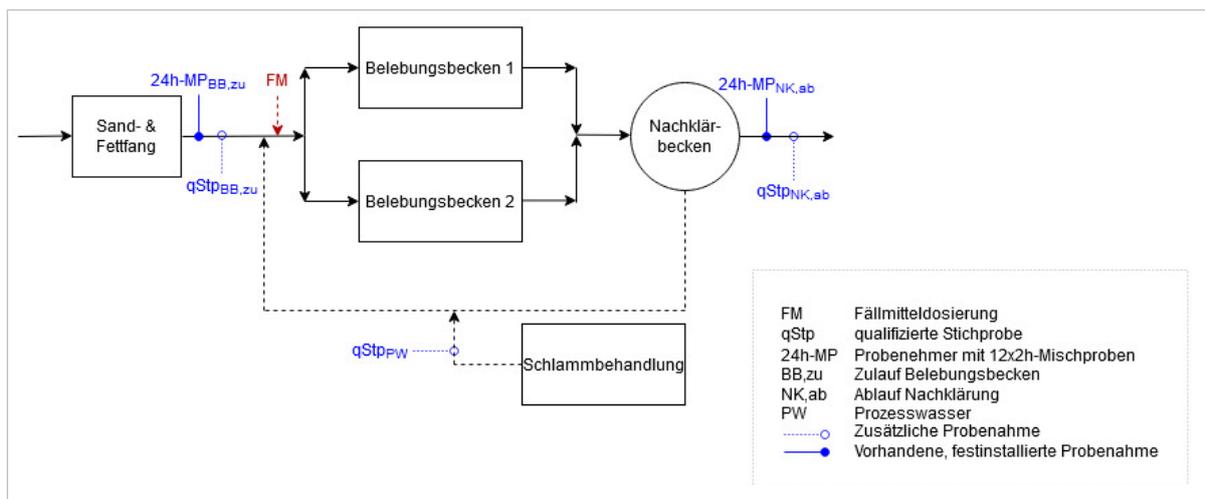


Abbildung 12: Vereinfachtes Verfahrensfliessbild der Kläranlage Gemünden

Ergebnisse des Messprogramms	
Zeitraum der Messungen	Februar bis März 2022
Art der Proben	qualifizierte Stichproben
Kurzbewertung zur Einhaltung des Betriebsmittelwertes während des Messprogrammes	<p>Im Mittel ergab sich eine C_P-Konzentration von 0,53 mg/L C_P. Der Mindestzielwert von 0,7 mg/L C_P wurde während des Messprogrammes an mehreren Regenwettertagen nicht eingehalten (3/5). Der Überwachungswert wurde allerdings in keiner der Proben überschritten.</p> <p>Bei Mischwasserzufluss wird die Fällmittelzugabe aufgrund von Kosteneinsparungen reduziert, sodass eine Erhöhung der Ortho-Phosphat-Phosphor-Gehalte im Ablauf zu beobachten ist.</p> <p>Insgesamt ist ein deutlicher Unterschied der C_P-Ablaufkonzentration zwischen RW- und TW-Abfluss zu beobachten.</p>
Ortho-Phosphat-Phosphor	<p>Der Phosphor im Ablauf der Kläranlage liegt mit durchschnittlich $0,34 \pm 0,15$ mg/L hauptsächlich in Form von Ortho-Phosphat-Phosphor und somit fällbar vor (\varnothing 63 % der C_P-Konzentration). Bei einer Unterscheidung nach Trocken- und Regenwetterabfluss, ist eine deutliche Zunahme der Ortho-Phosphat-Phosphor-Konzentration bei Regenwetterabfluss zu beobachten. Während im Trockenwetterfall Konzentrationen zwischen 0,190 – 0,415 mg/L S_{PO_4-P} gemessen wurden, lagen diese bei Regenwetterabfluss zwischen 0,240 – 0,740 mg/L S_{PO_4-P}.</p>

Ergebnisse des Messprogramms

Partikulärer Phosphor	Die partikuläre Fraktion (X_P) ist mit durchschnittlich $0,15 \pm 0,13$ mg/L weniger präsent (\emptyset 28 % der C_P -Konzentration), jedoch scheint Regenwetterabfluss einen signifikanten Einfluss auf die Zusammensetzung des Gesamtposphors im Ablauf der Kläranlage zu nehmen. Bei Mischwasserzufluss steigt die partikuläre Phosphor-Konzentration auf durchschnittlich $0,27 \pm 0,15$ mg/L. Dies zeigt, dass eine erhöhte hydraulische Belastung bei Regenereignissen zu Schlammabtrieb führen kann.
Gelöster nicht fällbarer Phosphor	Die Fraktion des gelösten nicht fällbaren Phosphors (S_{nfP}) schwankt im Ablauf zwischen $0,025 - 0,125$ mg/L und betrug während des Messprogrammes im Mittel $0,046 \pm 0,024$ mg/L, was dem derzeitigen Literaturmittelwert von $0,05$ mg/L entspricht (Böhler & Siegrist, 2008; Rott et al., 2016; Fundneider et al., 2019).
Kläranslagenspezifisches theoretisches Limit der Phosphorelimination	Als theoretisches Limit der Phosphorelimination konnte im Zeitraum des Messprogrammes eine S_{nfP} -Konzentration im Trockenwetterfall von \emptyset $0,038 \pm 0,012$ mg/L berechnet werden. Ein Maximalwert von $0,125$ mg/L S_{nfP} wurde bei Regenwetterabfluss erfasst.

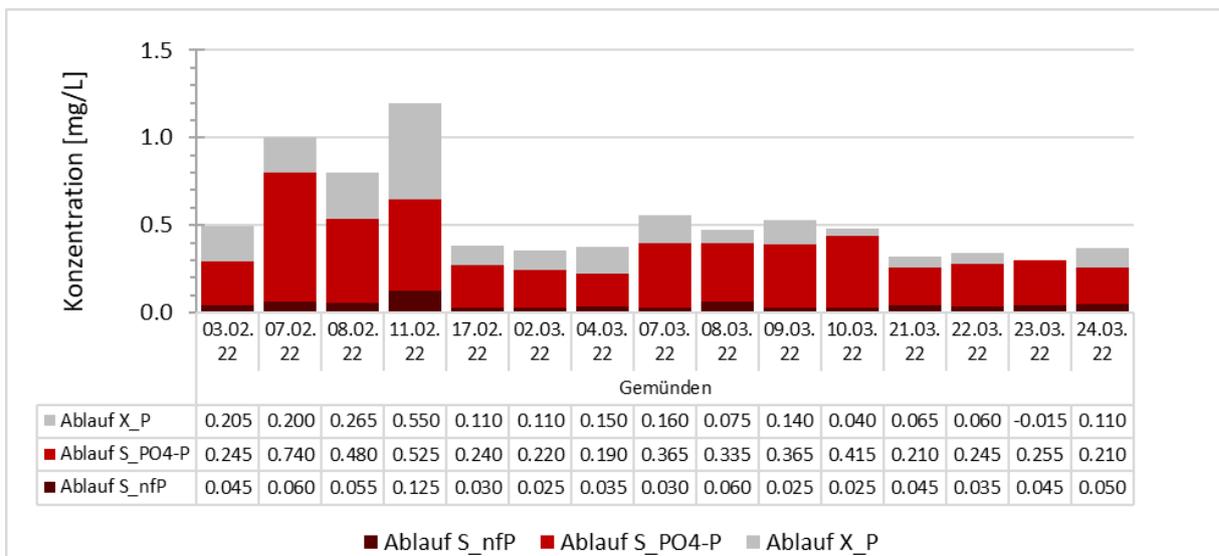


Abbildung 13: Ergebnisse der Messkampagne auf der KA Gemünden

Bewertung und Optimierungsmaßnahmen

Kurzbewertung zur Einhaltung des Betriebsmittelwertes	Der Betriebsmittelwert (BMW) liegt bei $0,22$ mg/L C_P (in 2020) bzw. $0,26$ mg/L C_P (in 2021) und erfüllt somit das Ziel des MKUEM, den vorgegebenen Mindestzielwert von $0,7$ mg/L C_P zu unterschreiten, deutlich.
--	--

Bewertung und Optimierungsmaßnahmen

Optimierungspotenzial und Umsetzungsvorschlag

S_{PO4-P} > 0,16: Es liegen Optimierungspotenziale zur Senkung der Ortho-Phosphat-Phosphor-Ablaufkonzentration vor, insbesondere bei Regenwetterabfluss.

Entsprechend **Abschnitt 2.3** bestehen verschiedene Ansätze zur Reduzierung des Ortho-Phosphat-Phosphors. Die Angaben zum genutzten β -Wert fehlen, sodass dieser in einem ersten Schritt geprüft werden sollte.

→ Es ist auffällig, dass der BMW ausschließlich bei Regenwetterabfluss überschritten wurde. Dies ist einerseits auf einen erhöhten Schlammabtrieb und damit eine erhöhte X_P-Konzentration und andererseits auf eine Verminderung der Fällmittelzugabe zurückzuführen, die einen Anstieg der S_{PO4-P}-Konzentration zur Folge hat.

→ Die erste Verbesserungsmaßnahme besteht in der Aufrechterhaltung der Fällmitteldosierung bei Mischwasserzufluss.

→ Hinsichtlich des Feststoffabtriebes im Regenwetterfall sollte eine Überprüfung des Schlammindex (ISV) und der Schlammvolumenbeschickung der Nachklärung (q_{SV}) erfolgen. Falls diesbezüglich keine Auffälligkeiten gefunden werden, kann eine Schlamm Spiegelberechnung sowie eine numerische Strömungssimulation der Nachklärung sinnvoll sein.

4 ZUSAMMENFASSUNG

Aus Sicht des Gewässerschutzes ist es bei p1-Wasserkörpern und deren Oberliegern notwendig, den Eintrag von Phosphor durch kommunale Kläranlagen weiter zu reduzieren. Die Auswertung der Ergebnisse der landesweiten Phosphorfraktionierung im Ablauf sowie die Ergebnisse der Detailmessprogramme zeigen ein deutliches Potenzial zur Verbesserung der Phosphorelimination auf vielen Kläranlagen.

Um den Status Quo der eigenen Kläranlage(n) bewerten zu können und spezifische Optimierungspotenziale abzuleiten, sollte eine Fraktionierung des Phosphors im Ablauf der Kläranlage erfolgen. Mithilfe der in der Regel auf Kläranlagen vorhandenen Küvetten-schnelltests ist eine vergleichsweise schnelle Beurteilung des Wirkungsgrades der Phosphorelimination möglich. Somit können notwendige Anpassungen zur Optimierung anhand der Ausführungen in Abschnitt 2.3 identifiziert werden.

Darüber hinaus rückt das Thema der Mikroschadstoffelimination auf kommunalen Kläranlagen immer mehr in den Fokus, sodass die Ergänzung einer weiteren Behandlungsstufe bei einigen Anlagen realisiert werden muss. In diesem Zusammenhang sollten die Synergieeffekte der Mikroschadstoffelimination auf die Phosphorelimination mitbetrachtet werden, sodass Prozesstechniken genutzt werden, die beiden Zielen zugutekommen. Hinweise auf entsprechende Synergieeffekte wurden auch bereits innerhalb des CoMinGreat-Projektes deutlich (Multhaup et al. 2023).

5 LITERATURVERZEICHNIS

AbwV (2022): Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV). Ausfertigungsdatum 21.03.1997, zuletzt geändert am 20.01.2022.

ATV-DVWK (2003): Vereinheitlichung und Herleitung von Bemessungswerten für Abwasseranlagen. April 2003. Hennef: ATV-DVWK Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e. V. (ATV-DVWK-Regelwerk Arbeitsblatt, A 198).

Böhler, M.; Siegrist, H. (2008): Möglichkeiten zur Optimierung der chemischen Phosphorfällung an hessischen Kläranlagen. Gutachten im Auftrag der Europa Fachhochschule Fresenius und des Hessischen Landesamtes für Umwelt und Geologie.

Bratby, J. (2016): Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment – Third Edition. Vol. Third Edition. London: IWA Publishing.

DIN EN ISO 6878: Wasserbeschaffenheit – Bestimmung von Phosphor – Photometrisches Verfahren mittels Ammoniummolybdat (ISO 6878:2004).

DWA (2011): Chemisch-physikalische Verfahren zur Elimination von Phosphor aus Abwasser. Mai 2011. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e. V. (Arbeitsblatt DWA-A 202).

DWA (2016): Bemessung von einstufigen Belebungsanlagen. Juni 2016. Hennef: DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e. V. (Arbeitsblatt DWA-A 131).

Fundneider, T.; Alejo, L.; Bitter, H.; Mathuni, L.; Döhler, C.; Reusch, F.; Pidde, A. V.; Lackner, S. (2019): Weitestgehende Phosphorentfernung und Synergieeffekte der Tuch- und Membranfiltration als nachgeschaltete Filtrationsverfahren in der Abwasserbehandlung. In: gwf - Wasser|Abwasser, (07-08), S. 79.

Hahn, H.H. (1982): Voraussetzungen für einen guten Wirkungsgrad der Fällungsreinigung, in Weitergehende Reinigung kommunaler Abwässer insbesondere zur Phosphatelimination. Hoechst AG: Hürth. p. 20-33.

Helmreich, B.; Huber, M.; Muntau, M.; Athanasiadis, K.; Steinle, E. (2017): Analyse einer möglichst weitestgehenden Phosphorelimination bei kommunalen Kläranlagen. Online verfügbar unter https://www.cee.ed.tum.de/fileadmin/w00cbe/sww/Publikationen/Endbericht-20170919_LfU-P-Elimination.pdf, zuletzt geprüft am 17.07.2023.

Knerr, H.; Steinmetz, H. (2020): Optimierung der Phosphorelimination mittels P-Fraktionierung bei kommunalen Kläranlagen – P-Opt, Analyseanleitung.

Jarvie, H. P.; Withers, P. J. A.; Neal, C. (2002): Review of robust measurement of phosphorus in river water: sampling, storage, fractionation and sensitivity. *Hydrology and Earth System Sciences*, 6(1), 113-132.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (Ed.) (2023): Kommunales Abwasser Lagebericht 2023. Online verfügbar unter https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Umwelt/Kommunales-Abwasser-Lagebericht-2023.pdf, zuletzt geprüft am 15.12.2023.

Multhaupt, A.; Gritten, F.; Salméron, I.; Hansen, J.; Knerr, H.; Dittmer, U. (2023): Spurenstoffelimination – Phosphorreduktion als Nebeneffekt. CoMinGreat Projekt. In: *wwt* (6), S. 27-33.

Rott, E., Minke, R., Steinmetz, H. 2016 Phosphonate als Bestandteil der gelösten organischen und partikulären Phosphorfraktion in Kläranlagen. *Wasser und Abfall* 2016, 5, 21-27.

6 BEGRIFFSERLÄUTERUNGEN

Begriff	Erläuterung
β-Wert	<p>Der β-Wert gibt an, welche Fällmittelmenge bezogen auf den zu fällenden Phosphor erforderlich ist. (DWA, 2011):</p> $\beta_{\text{Fäll}} = \frac{X_{\text{Me}}/AM_{\text{Me}} \left[\frac{\text{mol/L}}{\text{mol/L}} \right]}{X_{\text{P,Fäll}}/AM_{\text{P}} \left[\frac{\text{mol/L}}{\text{mol/L}} \right]}$ <p>Mit</p> <p>X_{Me} erforderliche Fällmittelmenge (Metall) in mg Me/L Abwasser</p> <p>$X_{\text{P,Fäll}}$ zu fällender Phosphor in mg P/L Abwasser</p> <p>AM_{Me} Atommasse des Metalls in mg/mol</p> <p>AM_{P} Atommasse des Phosphors in mg/mol</p>
Betriebs- bzw. Jahresmittelwert	<p>Pro Messereignis wird aus der gemessenen Konzentration und der dazugehörigen Abwassermenge (z.B. m³/h, m³/2h, m³/d) eine Einzelfracht für die entsprechende Zeitspanne errechnet. Die mittlere Fracht ist das arithmetische Mittel der Einzelfrachten. Die mittlere Fracht ist anschließend auf die Jahresfracht hochzurechnen. Der Betriebs- bzw. Jahresmittelwert ergibt sich dann aus der Jahresfracht dividiert durch die Gesamtabwassermenge. Bei Anlagen, die kontinuierlich messen, kann die Jahresfracht aus Tagesfrachten errechnet werden.</p>
C _P	Konzentration des Phosphors in der homogenisierten Probe als P (ATV-DVWK 2003)
p1 – Wasserkörper	Hintergrundinformationen zu den Methoden zur Festlegung von Pressures p1-Wasserkörpern kann unter https://gda-wasser.rlp-umwelt.de/GDAWasser/client/gisclient/index.html?&applicationId=51941 abgerufen werden.
S _{nfP}	Konzentration des gelösten (unter den Bedingungen, die auf der Kläranlage üblicherweise vorherrschenden) nicht fällbaren Phosphors in der filtrierten Probe als P
S _P	Konzentration des gesamten Phosphors in der filtrierten Probe (Filter mit Porenweite 0,45 µm) als P
S _{PO4-P}	Konzentration des Ortho-Phosphat-Phosphors in der filtrierten Probe als P (ATV-DVWK 2003)
X _P	Konzentration des partikulären Phosphors als P