

# Forschungsprojekt zur empirischen Erhebung der Perspektiven der Klärschlammbehandlung und Phosphor-Rückgewinnung aus verfügbaren Klärschlamm-Daten in Baden-Württemberg



Klare Konzepte. Saubere Umwelt.

Landesverband Baden-Württemberg

Rennstraße 8  
70499 Stuttgart

E-Mail: [info@dwa-bw.de](mailto:info@dwa-bw.de)  
Internet: [www.dwa-bw.de](http://www.dwa-bw.de)  
Tel.: +49 711 99589-100

## Bearbeitung

Dipl.-Ing. Carsten Meyer (UniS)  
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Zettl (HBC)  
Dr. rer. nat. Birgit Poppe (iat)  
Dr.-Ing. Werner Maier (Umweltberatung-wm)  
M.Sc. Jian Zhang (DWA-BW)  
Dr.-Ing. Tobias Reinhardt (DWA-BW)

Stuttgart, April 2025

Die Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA) setzt sich intensiv für die Entwicklung einer sicheren und nachhaltigen Wasser- und Abfallwirtschaft ein. Als politisch und wirtschaftlich unabhängige Organisation arbeitet sie fachlich auf den Gebieten Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall und Bodenschutz.

In Europa ist die DWA die mitgliederstärkste Vereinigung auf diesem Gebiet und nimmt durch ihre fachliche Kompetenz bezüglich Regelsetzung, Bildung und Information sowohl der Fachleute als auch der Öffentlichkeit eine besondere Stellung ein. Die rund 14.000 Mitglieder repräsentieren die Fachleute und Führungskräfte aus Kommunen, Hochschulen, Ingenieurbüros, Behörden und Unternehmen.

### **Impressum**

DWA-Landesverband Baden-Württemberg (DWA-BW)  
Rennstraße 8  
70499 Stuttgart  
Telefon: 0711 99589-100  
E-Mail: [info@dwa-bw.de](mailto:info@dwa-bw.de)  
Internet: [www.dwa-bw.de](http://www.dwa-bw.de)

© DWA-BW, 1. Auflage, Stuttgart, April 2025

### **Verfasser:**

Dipl.-Ing. Carsten Meyer  
Prof. Dr.-Ing. Ulrike Zettl  
Dr. rer. nat. Birgit Poppe  
Dr.-Ing. Werner Maier  
M.Sc. Jian Zhang

### **Redaktion:**

Dr.-Ing. Tobias Reinhardt

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieser Publikation darf vorbehaltlich der gesetzlich erlaubten Nutzungen ohne schriftliche Genehmigung der Herausgeberin in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Digitalisierung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen werden.

Projekt gefördert durch:  **Baden-Württemberg  
Ministerium für Umwelt, Klima  
und Energiewirtschaft**

Aktenzeichen des Zuwendungsbescheids: UM2-0430.3-2255/1/3

# Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	5
Tabellenverzeichnis.....	5
Abkürzungsverzeichnis .....	7
1	Hintergrund und Projektziele.....8
2	Datenerhebung und Plausibilisierung.....10
2.1	Vorgehensweise.....10
2.2	Umsetzung.....11
2.2.1	Datenerhebung.....11
2.2.2	Plausibilisierung der Rohdaten.....11
3	Ergebnisse der praxisbezogenen Datenanalyse.....14
3.1	Berichtspflichtige Kläranlagen.....14
3.2	P-rückgewinnungspflichtige Kläranlagen.....14
3.3	Klärschlamm- und Phosphormengen.....15
3.4	Aschemengen.....17
3.5	Angestrebte KS-Entsorgungswege und Phosphor-Rückgewinnung.....17
4	Ergebnisse der wissenschaftlichen Datenanalyse.....19
4.1	Datengrundlage.....19
4.2	Phosphorgehalt in den Klärschlämmen.....19
4.3	Klärschlämme mit einem Phosphorgehalt im Grenzbereich von 20 g P/kg TM.....21
4.4	Phosphorrückgewinnungs-Potenzial.....24
4.5	Zusammenhang zwischen der Art der Schlammbehandlung und dem Phosphorgehalt im Klärschlamm.....25
4.6	Zusammenhang zwischen der Art der Phosphorelimination und dem Phosphorgehalt im Klärschlamm.....29
4.7	Zusammenhang zwischen dem Fremdwasseranteil und dem Phosphorgehalt im Klärschlamm.....31
5	Aktuelle Projekte zum Bau von Klärschlammverbrennungsanlagen und P-Rückgewinnungsanlagen in Baden-Württemberg.....34
5.1	Überblick.....34
5.2	MAP-Anlage in Göppingen / Stadtentwässerung Göppingen (SEG).....34
5.3	MVV Mannheim (Müllheizkraftwerk).....35
5.4	P-Xtract / AZV Staufener Bucht (KA Grezhausen).....35
5.5	ZV Restmüllheizkraftwerk Böblingen (rbb).....36
5.6	KZV Südbaden / AZV Breisgauer Bucht (KA Forchheim).....36
5.7	KomPhoS GmbH / TTS GmbH (KA Bonndorf).....37
5.8	KSV Walheim / EnBW (Kohlekraftwerk Walheim).....37
6	Aktueller Stand zur Umsetzung der P-Rückgewinnungspflicht in Baden-Württemberg.....39
6.1	Einführung.....39
6.2	Strategien der Betreiber zur P-Rückgewinnung.....40
6.3	Verbrennungskapazitäten Baden-Württemberg / Bedarfsregionen.....41

7	Empfehlungen .....	44
7.1	Datenerhebung im Rahmen der Berichtspflicht 2027 .....	44
7.1.1	Erweiterung des Online-Portals "DWA Betrieb" .....	44
7.1.2	Verbesserung der Ausfüllhilfe zur Berichtspflicht nach § 3a AbfKlärV.....	44
7.2	Schulungsbedarf.....	45
7.2.1	Schulung des KA-Betriebspersonals über Nachbarschaftstreffen .....	45
7.2.2	Schulung des Personals der zuständigen Behörden .....	45
7.3	Klärung offener Fragen, z. B. durch eine LAGA-Arbeitsgruppe / Umweltministerkonferenz .....	45
7.3.1	Wann gilt der Grenzwert von 20 g P/kg TM als eingehalten (Analysehäufigkeit/Toleranzbereich)? .....	45
7.3.2	Verhältnismäßigkeit der Forderung nach P-Rückgewinnung für Betreiber von Kläranlagen der GK 1 bis 3 .....	46
7.3.3	Einhaltung der Grenzwerte der AbfKlärV (KS vs. KSA).....	46
7.3.4	Sicherstellung der Auslastung von P-Rückgewinnungsanlagen (Finanzierung) .....	47
7.3.5	Laufzeiten von Entsorgungsverträgen.....	47
8	Zusammenfassung und Fazit .....	48

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Summenkurve der in den baden-württembergischen Klärschlämmen gemessenen Phosphorgehalte – über alle Größenklassen .....	20
Abbildung 2: Summenkurve der in den baden-württembergischen Klärschlämmen gemessenen Phosphorgehalte – differenziert nach Größenklassen.....	21
Abbildung 3: Anteil der Kläranlagen, deren Klärschlämme Phosphorgehalte im „Grenzbereich“ 19,0-21,0 g P/kg TM aufweisen.....	22
Abbildung 4: Anteil der Kläranlagen, deren Klärschlämme Phosphorgehalte im „Grenzbereich“ 19,5-20,5 g P/kg TM aufweisen.....	23
Abbildung 5: Beitrag der Kläranlagen in BW zum Phosphor-Rückgewinnungspotenzial.....	25
Abbildung 6: Anzahl und Verteilung der gültigen und ungültigen Datensätze zur Analyse des Einflusses der Art der Schlammbehandlung auf den Phosphorgehalt im Klärschlamm .....	27
Abbildung 7: Verteilung des Phosphorgehalts im Klärschlamm, innerhalb der Kläranlagen-Größenklassen .....	27
Abbildung 8: Verteilung (über alle GK) des Phosphorgehalts in den Klärschlämmen, unterschieden nach getrennter anaerober Stabilisierung (GAnS) und getrennter aerober Stabilisierung (SAeS) .....	28
Abbildung 9: Verteilung (größenklassenscharf) des Phosphorgehalts in den Klärschlämmen, unterschieden nach getrennter anaerober Stabilisierung (GAnS) und getrennter aerober Stabilisierung (SAeS) .....	28
Abbildung 10: Verteilung der Arten der Phosphorelimination, unterschieden nach simultaner aerober Stabilisierung (SAeS) (links) und getrennter anaerober Stabilisierung (GAnS) (rechts) .....	29
Abbildung 11: Phosphorgehalt im aerob stabilisiertem Klärschlamm (SAeS), unterschieden nach Art der Phosphorelimination in der KA .....	30
Abbildung 12: Phosphorgehalt im anaerob stabilisiertem Klärschlamm (GAnS), unterschieden nach Art der Phosphorelimination in der KA .....	31
Abbildung 13: Korrelation des Phosphorgehalts im aerob stabilisiertem Klärschlamm (SAeS) mit dem Fremdwasseranteil (FWA).....	32
Abbildung 14: Korrelation des Phosphorgehalts im anaerob stabilisiertem Klärschlamm (GAnS) mit dem Fremdwasseranteil (FWA) .....	33
Abbildung 15: Fremdwasseranteil und Kläranlagen-Größenklasse – Verteilung und Zusammenhang .....	33
Abbildung 16: Thermische Klärschlammverwertung von baden-württembergischen Klärschlämmen 2020 .....	39
Abbildung 17: Übersicht zu Bestand und Planungen von Klärschlammmonverbrennungsanlagen in Baden-Württemberg .....	40
Abbildung 18: Räumliche Bedarfsabdeckung zur Klärschlammverbrennung in Baden-Württemberg. Grün hinterlegte Landkreise sind ländlich geprägt.....	42

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kläranlagen, deren Klärschlämme der Berichtspflicht nach § 3a AbfKlärV unterliegen .....	14
Tabelle 2: Erfasste EW mit P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlämmen nach GK .....	15
Tabelle 3: Übersicht des P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlamm-aufkommens und der Phosphorfrachten nach GK.....	16
Tabelle 4: Potenzial der anderweitigen Klärschlamm-entsorgung für nicht-P-rückgewinnungspflichtige Klärschlämme .....	16

Tabelle 5: Übersicht der zu erwartenden, geschätzten Aschemengen nach GK.....	17
Tabelle 6: Übersicht der geplanten Entsorgungswege nach GK.....	18
Tabelle 7: Nominelle und relative Anzahl der Kläranlagen sowie statistische Datenqualität...	19
Tabelle 8: Kläranlagen mit Klärschlämmen im Grenzwertbereich von 20 g P/kg TM.....	22
Tabelle 9: Beispiele zu angegebenen P-Gehalten in Klärschlämmen.....	23
Tabelle 10: Verbrennungskapazität für Baden-Württemberg (aktualisierte Prognose 2024, gerundete Werte) .....	41

## **Autoren**

Dipl.-Ing. Carsten Meyer (UniS – Universität Stuttgart):  
Kapitel 1, 4, 7 und 8

Prof. Dr.-Ing. Ulrike Zettl (HBC – Hochschule Biberach):  
Kapitel 1, 2, 3, 7 und 8

Dr. rer. nat. Birgit Poppe (iat – iat-Ingenieurberatung GmbH):  
Kapitel 1, 5, 6, 7 und 8

Dr.-Ing. Werner Maier (Umweltberatung-wm):  
Kapitel 1, 5, 6, 7 und 8

M.Sc. Jian Zhang (DWA-BW, DWA-Landesverband Baden-Württemberg):  
Kapitel 1, 2, 7 und 8

# Abkürzungsverzeichnis

AbfKlärV	Abfallklärschlammverordnung
Anz	Anzahl
AVR	Abfallverwertungsgesellschaft des Rhein-Neckar-Kreises mbH
AZV	Abwasserzweckverband
BW	Baden-Württemberg
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EW	Einwohnerwerte
f	Umrechnungsfaktor
FWA	Fremdwasseranteil
GAnS	Getrennte anaerobe Stabilisierung (Anlagen mit Klärschlammfäulung)
GK	Größenklasse (bei Kläranlagen) GK 1: 0-999 EW, GK 2: 1.000-5.000 EW, GK 3: 5.001-10.000 EW, GK 4A: 10.001-50.000 EW, GK 4B: 50.001-100.000 EW, GK 4: 10.001- 100.000 EW, GK5: > 100.000 EW
HKW	Hauptklärwerk
IG	Interessengemeinschaft
KA	Kläranlage
kbb	Zweckverband Klärschlammverwertung Böblingen
KS	Klärschlamm
KSA	Klärschlammmasche
KSV	Klärschlammverbrennung
KZV	Zweckverband Klärschlammverwertung
LRA	Landratsamt
LK	Landkreis
LUBW	Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg
Max	Maximum (größter Wert)
Min	Minimum (kleinster Wert)
MitV	Mitverbrennung
MonoV	Monoverbrennung (hier gleichbedeutend mit Klärschlammmonoverbrennung)
n	Stichprobenumfang (Anzahl Werte)
OS	Originalsubstanz
P	Phosphor (elementar)
P-Rück	P-Rückgewinnung
RP	Regierungspräsidium
SAeS	Simultane aerobe Schlammstabilisierung (Anlagen ohne Klärschlammfäulung)
TM	Trockenmasse
TR	Trockenrückstand
TS	Trockensubstanz
ZV	Zweckverband
ZVS	Zweckverband Steinhäule

# 1 Hintergrund und Projektziele

Durch die Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) ergibt sich ab 01.01.2029 eine Pflicht zur Phosphorrückgewinnung (P-Rückgewinnung) ab einem Phosphorgehalt im Klärschlamm von 20 g P/kg TM. Wenn der Phosphorgehalt im Klärschlamm diesen Grenzwert nicht unterschreitet, ist der Klärschlammherzeuger dazu verpflichtet, den Klärschlamm einer direkten Phosphorrückgewinnung zuzuführen. Dies gilt grundsätzlich für alle Klärschlammherzeuger, d. h. für alle kommunalen Kläranlagenbetreiber, unabhängig von Ausbaugröße oder Anschlusswert (EW) der Kläranlage. Alternativ kann der Erzeuger den Klärschlamm zur thermischen Vorbehandlung einer Klärschlammverbrennungsanlage oder Klärschlammmitverbrennungsanlage zuführen. Dann geht die Pflicht der Zuführung der Verbrennungasche oder des kohlenstoffhaltigen Rückstands zu einer Phosphorrückgewinnung oder zu einer stofflichen Verwertung des thermischen Produkts an den Betreiber o. g. Anlagen über. Es gilt festzuhalten, dass die AbfKlärV nicht vorschreibt, dass der Kläranlagenbetreiber die (bspw. technische) Phosphorrückgewinnung selbstständig durchzuführen hat.

Klärschlamm i. S. d. der AbfKlärV ist als Abfall aus der abgeschlossenen Abwasserbehandlung, dessen sich der Erzeuger entledigt und der den Betrieb verlässt, definiert. Rohschlämme, deren Behandlung (z. B. Entwässerung) nicht abgeschlossen ist, unterliegen nicht dem Abfallrecht und damit nicht der AbfKlärV.

Darüber hinaus wird eine bodenbezogene Klärschlammverwertung ab dem 01.01.2029 für alle Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 100.000 EW und ab dem 01.01.2032 für alle Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 50.000 EW bundesweit nicht mehr möglich sein. Da eine bodenbezogene Klärschlammverwertung in Baden-Württemberg ohnehin nicht mehr praktiziert wird (Klärschlammverbrennungs-Quote in den vergangenen Jahren bereits > 99%), sind faktisch alle baden-württembergischen Kläranlagen von den (überregionalen) Auswirkungen der gesetzlichen Änderungen betroffen.

Die Kläranlagenbetreiber werden vor die große Herausforderung gestellt, kosteneffektive und umweltgerechte Maßnahmen zu treffen, um die – eng miteinander verknüpften – Aufgaben zur sicheren Klärschlammentsorgung und P-Rückgewinnung zu bewerkstelligen. Dies vor dem Hintergrund, dass die technische P-Rückgewinnung ein noch relativ neuer Technologiebereich ist und Klärschlamm-Monoverbrennungskapazitäten aktuell (noch) stark limitiert sind.

Gemäß § 3a der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) haben alle „Klärschlammherzeuger, die im Kalenderjahr 2023 eine Abwasserbehandlungsanlage betreiben, [...] der zuständigen Behörde bis spätestens 31. Dezember 2023 einen Bericht über die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Sicherstellung der ab 1. Januar 2029 durchzuführenden Phosphorrückgewinnung [...] vorzulegen.“ Damit liegen nun nach Eingang der Berichte umfangreiche Daten zur zukünftigen Klärschlammentsorgung einschließlich Phosphorrückgewinnung vor.

Das zentrale Ziel dieses Projekts ist die empirische Untersuchung der Perspektiven zur thermischen Klärschlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung ab 2029 in Baden-Württemberg auf der Grundlage der folgenden, verfügbaren Klärschlamm-Daten:

- Berichte 2023 nach § 3a AbfKlärV
- DWA-Leistungsnachweis 2023
- Daten der LUBW zum Klärschlammaufkommen 2022.

Durch die Zusammenführung von Datensätzen der o. g. Datenpools lag nach Plausibilisierung eine sehr gute Datengrundlage zum Zweck der statistischen Auswertungen vor.

Vorrangiges Ziel der statistischen Auswertungen war es, die den Phosphorgehalt im Klärschlamm beeinflussenden Faktoren zu identifizieren und entsprechende Zusammenhänge (Korrelationen, Relationen) mit Hilfe statistischer Untersuchungen näher zu beschreiben. Unter anderem wurde untersucht, ob sich ein empirischer Zusammenhang zwischen dem Phosphorgehalt im Klärschlamm

und den prozesstechnischen Varianten der Schlammbehandlung und Phosphorelimination der Kläranlagen erkennen lässt. Mit Hilfe der Ergebnisse werden Einschätzungen des künftigen Phosphoranfalls im Zusammenhang mit dem Klärschlammaufkommen ermöglicht. Dies ist u. a. von Bedeutung für die langfristige Prognose von Klärschlammfall und dem damit verbundenen Phosphorpotenzial, beispielsweise vor dem Hintergrund der weiteren Zusammenlegung bzw. des Anschlusses kleinerer Kläranlagen und daraus resultierenden Verschiebungen und Veränderungen im Klärschlammfall. Die statistischen Auswertungen sollen ferner als Grundlage zur Überprüfung des aktuellen Stands der Klärschlammverbrennung und P-Rückgewinnung in Baden-Württemberg dienen, um auf dieser Basis zukünftige Anforderungen oder Probleme im Vollzug erkennen zu können.

Die erzeugte Zentraldatei kann darüber hinaus als Grundlage für eine landesweite digitale Klärschlammdatenbank dienen, die um weitere Parameter wie Schwermetallgehalte und organische Schadstoffe erweitert werden kann. Mit einem solchen digitalen Tool kann eine langfristige Entwicklung kontinuierlich über mehrere Jahre erkannt und deutlich gemacht werden.

## **2 Datenerhebung und Plausibilisierung**

### **2.1 Vorgehensweise**

#### **Ausfüllhilfe Baden-Württemberg**

Anfang Februar 2023 wurden seitens des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) alle Regierungspräsidien und Landratsämter (untere Abfall- und untere Wasserbehörden) über die Berichtspflicht 2023 informiert. Dieses Informationsschreiben ging auch nachrichtlich an die kommunalen Spitzenverbände – Landkreis-, Städte- und Gemeindetag Baden-Württemberg. Ergänzend wurde in dem Schreiben darum gebeten, als Bericht eine Excel-Datei zu verwenden. Diese Excel-Datei basiert auf der LAGA-Musterdatei und wurde von einer Arbeitsgruppe der Plattform P-RÜCK Baden-Württemberg um eine sog. Ausfüllhilfe ergänzt. Diese Ausfüllhilfe besteht aus Textbausteinen, die in den einzelnen Excel-Zellen hinterlegt sind. Nichtzutreffende Textbausteine sollten gelöscht werden. Mit der Ausfüllhilfe sollte zum einen den Kläranlagenbetreibern die Berichterstellung erleichtert und zum anderen den Behörden die Auswertung durch die standardisierten Textbausteine erleichtert werden.

Die Berichte sollten in Form dieser Excel-Datei in digitaler Form bei der zuständigen Behörde eingereicht werden. Eine Abgabe in Papierform oder als PDF-Datei sollte nicht erfolgen. Auf Unterschrift und Stempel wurde verzichtet.

#### **Häufig gestellte Fragen (FAQs)**

Im Anschluss an das Informationsschreiben des Umweltministeriums gingen einige Rückfragen zu den Formalien bzw. der AbfKlärV beim DWA-Landesverband Baden-Württemberg ein. Hieraus wurden zehn häufig gestellte Fragen identifiziert (FAQs), die vom Umweltministerium beantwortet und im September 2023 über die Plattform P-RÜCK Baden-Württemberg per E-Mail verteilt wurden. Darüber hinaus wurden Ende Oktober 2023 in einem öffentlichen Web-Seminar der Plattform P-RÜCK Baden-Württemberg Hilfestellungen für Kläranlagenbetreiber erläutert.

#### **Zuständigkeiten und Aufgaben der Behörden**

Da die Berichtspflicht in der AbfKlärV geregelt ist, fällt die Erhebung und Aggregation der Daten somit originär in die Zuständigkeit der Abfallbehörde. Andererseits werden Daten von Kläranlagenbetreibern erhoben und eine fachliche Prüfung könnte effizienter über die Wasserbehörde durchgeführt werden. Daher wurden in den einzelnen Landkreisen die Zuständigkeiten jeweils intern geklärt und den Kläranlagenbetreibern mitgeteilt, bis zum 31.12.2023 die Excel-Datei mit der Ausfüllhilfe an die zuständige Behörde zu übermitteln.

Ende Februar 2024 wurde das oben genannte Schreiben zur Berichtspflicht aktualisiert. Nachrichtlich wurde es wieder an die kommunalen Spitzenverbände in Baden-Württemberg sowie zusätzlich an die Landesanstalt für Umwelt (LUBW) und den DWA-Landesverband Baden-Württemberg adressiert. Die zuständigen Behörden wurden dabei gebeten, die Dateien auf Vollständigkeit sowie Übereinstimmung des angegebenen Namens der Kläranlage(n) mit den Namen in WIBAS zu prüfen.

#### **Erstellung einer Zentraldatei**

Die eingereichten Berichte wurden von der Projektgruppe in eine große Zentraldatei eingelesen und mit Daten aus dem DWA-Leistungsnachweis 2023 sowie mit Daten der LUBW zum Klärschlammaufkommen 2022 ergänzt. Mit dem Zusammenführen der Daten sollte die Plausibilisierung der Rohdaten erleichtert und weitere Informationen zur Datenanalyse dazu gewonnen werden.

## **2.2 Umsetzung**

### **2.2.1 Datenerhebung**

In Baden-Württemberg sind über den Leistungsvergleich 2023 insgesamt 862 Kläranlagen erfasst. Von diesen 862 Kläranlagen haben 718 Kläranlagenbetreiber einen Bericht abgegeben. Mit diesen Berichten liegt die Erfassungsrate in Baden-Württemberg bei

- 83 % bezogen auf die Anzahl der Kläranlagen
- 95 % bezogen auf die Ausbaugröße der Kläranlagen und
- 98% bezogen auf den Klärschlammanfall der Kläranlagen.

Dies stellt eine gute Datenbasis für weitere Betrachtungen dar.

Zunächst wurde geprüft, welche Kläranlagenbetreiber, die über den DWA-Leistungsnachweis erfasst werden, keinen Bericht abgegeben haben. Zwei dieser Kläranlagen berichten ohnehin nach Bayern und eine Kläranlage liegt in der Schweiz. Damit reduzierte sich die für die Betrachtungen einschlägige Gesamtanzahl auf 859 Kläranlagen in Baden-Württemberg. Bei Kläranlagen der GK 4 und 5 wurde per Telefon und E-Mail nachgefragt, um fehlende Berichte im Excel-Dateiformat abzufragen. Dies erfolgte auch bei den Kläranlagen, die den Bericht als PDF-Datei eingereicht haben. Es verblieben jedoch 71 Kläranlagen der GK 1 bis 3, die keinen Bericht abgegeben haben. Aufgrund der großen Anzahl und der doch nur geringen Schlammengen, wurde im Rahmen dieses Projektes von weiteren Nachfragen zu den Kläranlagen der GK 1 bis 3 abgesehen.

Mehr als 100 Kläranlagenbetreiber hatten einen Bericht eingereicht, obwohl sie ihren Nassschlamm an eine benachbarte Kläranlage abgegeben und die Schlammbehandlung somit nicht abgeschlossen hatten. Nach den Vorgaben des Umweltministeriums (FAQs) sind diese Kläranlagen nicht berichtspflichtig. Diese Berichte wurden daher von der Auswertung ausgenommen.

Die vorliegenden Berichte wurden in einer Zentraldatei zusammengeführt. In dieser Zentraldatei wurde pro Kläranlage eine Zeile angelegt, in weiteren Spalten wurden die Daten aus dem DWA-Leistungsnachweis 2023 sowie die Klärschlamm Daten aus 2022 der LUBW ergänzt. Dies ermöglichte eine umfangreiche Plausibilitätsprüfung (vgl. Kapitel 2.2.2) sowie eine wissenschaftliche, statistische Datenanalyse (vgl. Kapitel 4).

### **2.2.2 Plausibilisierung der Rohdaten**

Vor dem Hintergrund, dass die Berichtspflicht nach AbfKlärV seitens der Klärschlammherzeuger im Jahr 2023 erstmalig durchzuführen war, konnte eine fehlerfreie Angabe aller Daten nicht erwartet werden. Aus diesem Grund wurden die mit den Berichten erhaltenen Rohdaten nachträglich plausibilisiert. Angaben, die unstimmg erschienen, wurden direkt mit den entsprechenden Kläranlagenbetreibern erläutert (per E-Mail oder Telefon). Viele der relevanten fehlenden Berichte wurden nachträglich durch das Projektteam angefordert.

Die Plausibilisierung der Rohdaten fand in mehreren Schritten statt:

- Eingrenzung der Berichtspflicht über Sortierung nach Entwässerungsverfahren, Trockensubstanz-Gehalt, Informationen zur Nassschlammabgabe an benachbarte Kläranlagen
- Abgleich der angeführten Klärschlammengen mit Ausbaugröße, Auslastung, Stabilisierungsverfahren, TR des abgegebenen Klärschlammes, etc.
- Prüfung der angegebenen P-Gehalte über Größenordnung, Bilanzierung der eliminierten P-Frachten sowie Korrelation mit der P-Zulaufkonzentration und dem Fremdwasseranteil (FWA).

Einige Angaben bzw. Sachverhalte, die im Rahmen der Plausibilisierung Probleme bereiteten, werden im Folgenden näher erläutert:

- Einige der in der Excel-Ausfüllhilfe vorzuwählenden Textbausteine sind missverstanden worden. Beispielsweise lieferten mehr als 100 Kläranlagen Nassschlamm an andere Kläranlagen, davon jedoch einige mit angegebenen Entwässerungsgraden > 25 % TR. Folglich wurde entwässerter Klärschlamm als Nassschlamm aufgefasst. Mit der Entwässerung ist jedoch die Schlammbehandlung faktisch abgeschlossen. Somit wird der Kläranlagenbetreiber als Klärschlammherzeuger bezüglich dieses Schlammes berichtspflichtig.
- Bei den geplanten Maßnahmen werden vereinzelt „Nassschlammabgabe“ und zugleich „mobile Entwässerung“ genannt. Folglich blieb die weitere Klärschlammbehandlung oder -verwertung unklar. Daraus ergab sich das Problem, dass vermutlich auch Kläranlagenbetreiber, die eigentlich keiner Berichtspflicht unterlagen, Berichte einreichten. Es mangelte demnach an einer konkreten, nachvollziehbaren Information, ob überhaupt eine Verpflichtung zur Berichtsabgabe vorlag. Diese hätte im Vorfeld durch die zuständigen Behörden erfolgen können, wie es beispielsweise vom Abwasserreferat des Regierungspräsidiums Stuttgart praktiziert wurde.
- Problematisch war auch die inhomogene Angabe der Klärschlammengen bezüglich Herkunft (Eigenschlamm oder Fremdschlamm) und Beschaffenheit (Trockenmasse oder Originalsubstanz). Dies ließ sich aufgrund der großen Anzahl an Kläranlagen nicht durch nachträgliche Abfragen berichtigen. Für Korrekturen wurden daher die Daten der LUBW zum Klärschlammaufkommen 2022 verwendet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich die Plausibilisierungsarbeiten durch folgende Schwachstellen sehr aufwändig gestalteten:

- fehlerhafte Angaben der Kläranlagenbetreiber zum P-Gehalt (z. B. Angabe  $P_2O_5$  statt P[elementar]; Angabe in (g P/kg TM) anstatt (mg P/kg TM))
- fehlerhafte Angaben der Kläranlagenbetreiber zum Schlammanfall (Angabe Trockenmasse (TM) anstatt entwässerter Klärschlamm (OS), Angabe Eigenschlamm auch wenn Fremdschlamm enthalten war)
- Abgabe der Berichte im PDF-Format machte händische Übertragung in die Excel Datei erforderlich
- unvollständige Anzahl an Berichten aus einzelnen Landkreisen (Berichte mussten nachgefordert werden)
- missverständliche Textbausteine (entwässerter/getrockneter Klärschlamm)
- Angabe mehrerer sich widersprechender Textbausteine

Beispielsweise wurden als zukünftige Klärschlammbehandlungswege mehrmals die interkommunale Monoverbrennung und zugleich die Ausschreibung als Dienstleistung

genannt; Bei vielen Berichten kann davon ausgegangen werden, dass alle Textbausteine stehen gelassen wurden und nicht – wie erbeten – Nichtzutreffendes gelöscht wurde.

- Kooperationen bei der Schlammbehandlung waren nicht immer offensichtlich (Abgabe von Nassschlamm an Nachbarkläranlagen).
- widersprüchliche Angaben bei geplanten Maßnahmen, z. B. keine Notwendigkeit zur künftigen P-Rückgewinnung, obwohl P-Gehalte im Klärschlamm über 20 g P/kg TM liegen, oder Mehrfachnennungen, z. B. interkommunale Klärschlammverbrennung und zugleich Verbrennung in Dienstleistung.

Soweit erforderlich, wurden für die Kläranlagen der GK 4 und 5 erkennbar fehlerhafte Analysewerte korrigiert oder beim Betreiber nachgefragt. Fehlende Berichte und/oder fehlerhafte Angaben traten gehäuft bei den kleineren Kläranlagen der Größenklassen 1 bis 3 auf, von denen es in den ländlichen Regionen von Baden-Württemberg noch eine Vielzahl gibt. Die Plausibilisierung der Klärschlammengen über die Ausbaugröße, die Auslastung, das Stabilisierungsverfahren und den TR-Gehalt des entwässerten Schlammes gestaltete sich bei diesen Kläranlagen außerordentlich schwierig. Aufgrund der großen Anzahl an Kläranlagen und der geringen Schlammengen in diesen Größenklassen, wurde im Rahmen dieses Projektes auf weitere Nachfragen verzichtet, um den Arbeitsaufwand auf ein angemessenes Maß zu beschränken.

Abschließend ist festzuhalten, dass die Datengrundlage grundsätzlich umfangreich und verwertbar ist, jedoch in einigen Details kritisch bewertet werden muss.

## 3 Ergebnisse der praxisbezogenen Datenanalyse

### 3.1 Berichtspflichtige Kläranlagen

Insgesamt wurden Berichte zu 718 Kläranlagen eingereicht. Von diesen eingereichten Berichten wurden vom Projektteam 601 Kläranlagen (i. S. d. Klärschlammherzeugung) als berichtspflichtig identifiziert<sup>1</sup>. Die Verteilung dieser Berichte auf die verschiedenen Größenklassen ist **Tabelle 1** zu entnehmen.

*Tabelle 1: Kläranlagen, deren Klärschlämme der Berichtspflicht nach § 3a AbfKlärV unterliegen*

GK	Anzahl Kläranlagen in BW im DWA-Leistungsnachweis 2023	Anzahl abgegebene Berichte	davon berichtspflichtige Kläranlagen <sup>2</sup>
1	160	83	43
2	212	168	119
3	143	128	115
4	306	301	286
5	38	38	38
Summe	859	718	601

### 3.2 P-rückgewinnungspflichtige Kläranlagen

Gemäß der AbfKlärV greift die P-Rückgewinnungspflicht ab 2029 für alle Klärschlämme, deren P-Gehalt  $\geq 20$  g P/kg TM beträgt. Die Verbrennung in Zement- oder Kohlekraftwerken, die in Baden-Württemberg dominiert, ist dann nur noch für diejenigen Klärschlämme zulässig, deren P-Gehalt unterhalb des Grenzwertes liegt (bzw. für Anlagen der GK 1 bis 4A nur in besonderen Ausnahmefällen mit Sondergenehmigung). Werden Klärschlämme, deren P-Gehalt  $\geq 20$  g P/kg TM beträgt, in Kohlekraftwerken (Mitverbrennung) oder Monoverbrennungsanlagen thermisch verwertet, muss Phosphor aus der Asche zurückgewonnen werden.

Somit dürfen Klärschlämme mit einem P-Gehalt unter 20 g P/kg TM weiterhin in Zementwerken oder Müllverbrennungsanlagen verbrannt werden (anderweitige Verbrennung). Für alle anderen Klärschlämme, die in einem Kohlekraftwerk mitverbrannt oder einer Monoverbrennung verbrannt werden, greift die P-Rückgewinnungspflicht aus der Asche. Bei Verbrennung bzw. Mitverbrennung dieser Klärschlammes geht die P-Rückgewinnungspflicht auf den Betreiber der Verbrennungsanlage über.

Mehr als 140 der Kläranlagen, die einen Bericht abgegeben hatten, gaben keinen Messwert für den P-Gehalt an. Hierunter fielen auch viele Kläranlagen, die ihren Nassschlamm zur abschließenden Schlammbehandlung an andere Kläranlagen liefern und somit gar nicht berichtspflichtig sind. Die fehlenden Analysen treten überwiegend bei den Kläranlagen der GK 1 bis 3 auf. In GK 4 haben 22 Kläranlagen keinen Wert für den P-Gehalt angegeben. Die fehlenden Analysewerte bei

<sup>1</sup> Berichtspflichtig sind alle **Klärschlammherzeuger**, die im Kalenderjahr 2023 eine Abwasserbehandlungsanlage betreiben (auch diejenigen, die ihre Anlagen bis spätestens 2029 stilllegen und auch Kläranlagen, die entwässerten Klärschlamm zur gemeinsamen Behandlung (z. B. Trocknung, Verbrennung) zur Kläranlage „B“ befördern).

**Nicht betroffen sind** Abwasserbehandlungsanlagen, die **nicht entwässerten Schlamm (= Rohschlamm)** zu einer Kläranlage „B“ transportieren, z. B. zur gemeinsamen Stabilisierung und/oder Entwässerung. Die Einschätzung erfolgte anhand der Angaben im Bericht sowie den Kläranlagendaten aus dem DWA-Leistungsnachweis.

<sup>2</sup> Nach Einschätzung des Projektteams, vorbehaltlich einer Überprüfung der zuständigen Behörden. Drei der im baden-württembergischen Leistungsnachweis gelisteten Kläranlagenstandorte liegen außerhalb Baden-Württembergs und berichten dementsprechend.

berichtspflichtigen Kläranlagen führen dazu, dass die weitere Auswertung gewissen Unsicherheiten unterliegt.

Die statistische Auswertung der P-Gehalte zeigt, dass Klärschlämme mit P-Gehalten unter 20 g P/kg TM überwiegend auf Kläranlagen der GK 1 und 2 anfallen (vgl. **Tabelle 2**). Oftmals unterliegen diese Kläranlagen keinen oder niedrigen Anforderungen an die Phosphorelimination aus dem Abwasser.

*Tabelle 2: Erfasste EW mit P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlämmen nach GK*

GK	berichtspflichtige Kläranlagen <sup>3</sup>	Anzahl der Kläranlagen mit P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlämmen <sup>4</sup>	Ausbau-EW in BW	Ausbau-EW mit P-Rückgewinnungspflicht
1	43	8	75.306	3.850
2	119	58	594.581	181.000
3	115	89	1.054.420	652.000
4	286	248	9.620.605	8.213.000
5	38	36	10.362.713	9.280.000
<b>Summe</b>	<b>601</b>	<b>439</b>	<b>21.707.625</b>	<b>18.329.850</b>

In der GK 5 wiesen die Klärschlämme zweier Kläranlagen P-Gehalte < 20 g P/kg TM auf. Dabei handelte es sich um die Kläranlage Dußlingen (Abwasserverband Steinlach-Wiesaz) mit einem mittleren P-Gehalt von 14,45 g P /kg TM aus 20 Proben sowie um die Kläranlage Wiesloch (Abwasser- und Hochwasserschutzverband Wiesloch AHW) mit einem mittleren P-Gehalt von 19,90 g P /kg TM aus vier Proben. Bei der Kläranlage Wiesloch lagen einzelne Messungen über dem Grenzwert.

Letztendlich ist aufgrund der aktuellen Klärschlammmentsorgung in Baden-Württemberg (bereits jetzt werden etwas mehr als 99 % der Klärschlämme thermisch verwertet) und aufgrund der festgestellten P-Gehalte in den Klärschlämmen davon auszugehen, dass zukünftig der überwiegende Teil der in Baden-Württemberg anfallenden kommunalen Klärschlämme in Monoverbrennungsanlagen verbrannt werden und demzufolge der Phosphor aus den Klärschlammaschen zurückzugewinnen sein wird.

### 3.3 Klärschlamm- und Phosphormengen

#### P-rückgewinnungspflichtige Klärschlammengen

Die LUBW erfasste für 2022 eine Schlammmenge von 217.224 t TM/a. Davon wurden auf Basis dieser Auswertung über 94,3 % als P-rückgewinnungspflichtig eingeordnet. Diese hohe Quote ist auch auf die Sachlage zurückzuführen, dass viele kleinere Kläranlagen ihre Nassschlämme zur weiteren Schlammbehandlung bei größeren Kläranlagen anliefern. Die P-Rückgewinnungspflicht greift dort sowohl für die angelieferten Fremdschlämme als auch für die Eigenschlämme.

<sup>3</sup> Nach Einschätzung des Projektteams, vorbehaltlich einer Überprüfung der zuständigen Behörden

<sup>4</sup> Ermittelt aus den berichtspflichtigen Kläranlagen und dem P-Gehalt im Klärschlamm, vorbehaltlich einer korrekten Übertragung der P-Gehalte aus den Analyseprotokollen. Kläranlagen ohne Analysewerte sind in den Summen nicht enthalten.

*Tabelle 3: Übersicht des P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlammaufkommens und der Phosphorfrachten nach GK*

GK	Klärschlamm-Aufkommen in t TM/a (Eigenschlämme, LUBW 2022)	Anzahl der Kläranlagen mit P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlämmen <sup>3</sup>	P-rückgewinnungspflichtige Klärschlamm-mengen in t TM/a (Eigen- und Fremdschlämme)	Enthaltene P-Fracht in t P/a <sup>5</sup>
1	420	8	61	2
2	6.703	58	3.298	89
3	13.225	89	10.501	288
4	106.792	248	95.865	2.948
5	90.084	36	95.027	3.135
<b>Summe</b>	<b>217.224</b>	<b>439</b>	<b>204.752</b>	<b>6.462</b>

Über die angegebenen P-Gehalte in den Schlämmen kann die enthaltene P-Fracht auf ca. 6.460 t P/a geschätzt werden.

Zukünftige Anschlüsse kleinerer Kläranlagen an benachbarte größere Kläranlagen werden dazu führen, dass die P-rückgewinnungspflichtige Klärschlamm-menge geringfügig steigen wird. Ebenso werden höhere Anforderungen an die P-Elimination bei kleineren Kläranlagen zu einem höheren P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlammaufkommen führen.

#### **Nicht-P-rückgewinnungspflichtige Klärschlamm-mengen im (weiteren) Umkreis von Zementwerken**

Nicht-P-rückgewinnungspflichtige Klärschlämme dürfen im Sinne der AbfklärV weiterhin in Zementwerken thermisch verwertet werden. In Baden-Württemberg sind derzeit vier Zementwerke in Betrieb. Für die jeweiligen Standorte wurden die nicht-P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlamm-mengen aus dem jeweiligen Landkreis sowie den unmittelbar benachbarten Landkreisen bilanziert. Da es sich meist um Kläranlagen der GK 1 bis 3 handelt und für einige keine Analyseergebnisse zum P-Gehalt vorliegen, könnten die tatsächlich durch anderweitige Klärschlamm-entsorgung verwertbaren Klärschlamm-mengen noch größer sein, als in **Tabelle 4** angegeben.

*Tabelle 4: Potenzial der anderweitigen Klärschlamm-entsorgung für nicht-P-rückgewinnungspflichtige Klärschlämme*

Zementwerk/Papierfabrik im Landkreis	Benachbarte Landkreise (regional)	Nicht-P-rückgewinnungspflichtige KS-Mengen in t TM/a
LK Heidenheim	Heidenheim, Ostalbkreis, Göppingen	2.356
Alb-Donau-Kreis (2 Zementwerke)	Alb-Donau-Kreis, Reutlingen, Esslingen, Biberach	1.158
Zollernalbkreis	Zollernalb, Rottweil, Tuttlingen, Sigmaringen	325
Ortenaukreis (Papierfabrik)	Freudenstadt	42

<sup>5</sup> Überschlägig abgeschätzt aus den berichtspflichtigen Kläranlagen, dem P-Gehalt im Klärschlamm und den Klärschlamm-mengen

Anhand dieser Klärschlammengen (ca. 2 % des landesweiten Klärschlammaufkommens) können die Betreiber der Zementwerke entscheiden, ob sie bereit sind, eine Mitverbrennung von Klärschlamm, deren P-Gehalt unterhalb des Grenzwertes liegt, auch nach 2029 aufrecht zu erhalten.

### 3.4 Aschemengen

Da zu den Klärschlammengen nur vereinzelt Glühverluste (GV) angegeben wurden, werden die Aschemengen pauschal über Literatur- und Erfahrungswerte abgeschätzt. Dabei wird für Kläranlagen der GK 1 und 2 ein GV von 68 % angenommen, für die Kläranlagen der GK 3 bis 5 ein GV von 58 %. Diese Werte gelten lt. DWA-M 368 für simultan aerob stabilisierte Schlämme bzw. für Faulschlämme. Der Glühverlust wird bei Glühtemperaturen von ca. 550 °C bestimmt. Die Verbrennung erfolgt dagegen bei deutlichen höheren Temperaturen (ca. 850 °C), bei denen zusätzlich Carbonate und andere Inhaltsstoffe verglühen und Kristallwasser verloren geht. Die Aschemengen fallen daher geringer aus als wenn sie über die Trockenmasse und den Glühverlust berechnet werden. Aus Vergleichsmessungen einer Kläranlage wird ein Faktor aus dem Verhältnis Glührückstand (GR) und Aschegehalt (bei 815 °C) gebildet<sup>6</sup>. Die über diese pauschalen Ansätze geschätzten Aschemengen sind **Tabelle 5** zu entnehmen.

*Tabelle 5: Übersicht der zu erwartenden, geschätzten Aschemengen nach GK*

GK	Anzahl der Kläranlagen mit P-rückgewinnungspflichtigen Klärschlämmen <sup>7</sup>	P-rückgewinnungspflichtige Klärschlammengen in t TM/a (Eigen- und Fremdschlämme)	Enthaltene P-Fracht in t P/a	Geschätzte Aschemenge in t/a
1	8	61	2	18
2	58	3.298	89	995
3	89	10.501	288	4.150
4	248	95.865	2.948	37.600
5	36	95.027	3.135	37.300
<b>Summe</b>	<b>439</b>	<b>204.752</b>	<b>6.462</b>	<b>80.063</b>

### 3.5 Angestrebte KS-Entsorgungswege und Phosphor-Rückgewinnung

Die Betreiber sollten gemäß der LAGA-Musterdatei und der dort hinterlegten Ausfüllhilfe angeben, welche Maßnahmen geplant und welche evtl. schon eingeleitet sind. Bei beiden Abfragen sollen jeweils zwischen der thermischen Klärschlammbehandlung und der eigentlichen P-Rückgewinnung differenziert werden.

Zur Klärschlamm Entsorgung wurde abgefragt, ob eine (inter-)kommunale Monoverbrennung geplant ist oder die Klärschlamm Entsorgung als Dienstleistung vergeben werden soll. Als Alternativen wurden zudem Monoverbrennungen in öffentlich-privater Partnerschaft (PPP), P-Abreicherung am Kläranlagenstandort mit anschließender Mitverbrennung oder eine bodenbezogene Verwertung abgefragt.

<sup>6</sup> Die Aschemengen für die Schlämme aus den Kläranlagen der GK 3 bis 5 werden grob über einen Glührückstand von GR = 42 % und einem Verhältnis Glührückstand/Ascherückstand = 1,07 geschätzt. Für die Schlämme der GK 1 und 2 werden ein GR = 32 % und ein Verhältnis Glührückstand/Ascherückstand = 1,06 angesetzt.

<sup>7</sup> Ermittelt aus den berichtspflichtigen Kläranlagen, dem P-Gehalt im Klärschlamm und den Klärschlammengen. Kläranlagen ohne Analysewert zum P-Gehalt sind hier nicht einsortiert.

Zur P-Rückgewinnung wurden technische Maßnahmen (P-Rückgewinnung im Rahmen der Verbrennung oder nach der Verbrennung aus der Klärschlammasche), organisatorische Maßnahmen (eigene Anlagen, Ausschreibung als Dienstleistung), Langzeitlagerung der Aschen etc. abgefragt.

Die Auswertung zeigt, dass sich mit dieser Abfrage viele Kläranlagenbetreiber schwergetan haben. Insbesondere Kläranlagenbetreiber mit mehreren Kläranlagen haben in den folgenden Unterregistern alle Angaben der Ausfüllhilfe stehen gelassen, da sie bereits für ihre Hauptkläranlage die Informationen gegeben haben. Viele Betreiber haben sich noch mehrere Optionen wie (inter-)kommunale MonoV und Vergabe als Dienstleistung offengelassen. Soweit dem Projektteam die relevanten Informationen vorlagen, wurden die Angaben der Kläranlagenbetreiber in den GK 4 und 5 angepasst. Daraus ergibt sich folgendes Bild:

*Tabelle 6: Übersicht der geplanten Entsorgungswege nach GK*

	Kommunale MonoV als thermische Vorbehandlung				Vergabe als Dienstleistung zur thermischen Vorbehandlung mit P-Rückgewinnung				P-Abreicherung am KA-Standort		Summe Anzahl
	Anzahl	Anzahl (%)	KS-Menge in t TM/a	KS-Menge in %	Anzahl	Anzahl in %	KS-Menge in t TM/a	KS-Menge in %	Anzahl	KS-Menge in t TM/a	
GK 4 <sup>8</sup>	134	52	46.568	50	122	48	47.233	50	0	0	256
GK 5	19	53	61.130	62	16	44	35.888	36	1	2.280	36
Summe GK 4 + 5	153	52	107.698	56	138	47	83.121	43	1	2.280	292

Überschlägig bilanziert soll rund die Hälfte der baden-württembergischen Klärschlämme in kommunalen Klärschlammverbrennungsanlagen verwertet und die Verwertung der anderen Hälfte als Dienstleistung vergeben werden.

Gemäß Artikel 5 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung haben die Betreiber von Klärschlammmono- und Klärschlammmitverbrennungsanlagen ab dem 1. Januar 2029 die Klärschlammaschen einer Phosphorrückgewinnung oder einer stofflichen Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts der Verbrennungsaschen zuzuführen, wenn sie Klärschlämme verwerten, deren P-Gehalt  $\geq 20$  g P/kg TM beträgt. Somit liegt die Wahl der technischen Verfahren bzw. der organisatorischen Durchführung im Verantwortungsbereich der Betreiber von Klärschlammmono- und -mitverbrennungsanlagen. Eine Auswertung anhand vorliegender Projektinformationen ist daher zielführender als über die Angaben zur Berichtspflicht (vgl. Kapitel 5 und 6).

<sup>8</sup> Mehrfachnennungen enthalten

## 4 Ergebnisse der wissenschaftlichen Datenanalyse

### 4.1 Datengrundlage

Als Rohdatengrundlage zur statistischen Verarbeitung der Klärschlammdata diente die in Kapitel 2 erläuterte Zentraldatei, d. h. 718 Berichte (Datensätze) von insgesamt 859 kommunalen Kläranlagen in BW. Von dieser Rohdaten-Grundgesamtheit zu unterscheiden sind die zur statistischen Verwertung bzw. wissenschaftlichen Analyse tatsächlich verwertbaren Datensätze. Die Rohdaten-Grundgesamtheit wurde daher zunächst einer weiteren Datenplausibilisierung unterzogen, um offensichtliche falsche Werte, z. B. Dezimalfehler oder fehlende Werte, zu erkennen. Dies betraf u. a. auch unplausibel hohe oder niedrige Werte von Phosphorgehalten im Klärschlamm. Seitens der Kläranlagen nicht bestätigte Phosphorgehalte, die unter 10.000 mg/kg TM oder über 60.000 mg/kg TM lagen wurden ausgeschlossen. Nach der Datenbereinigung verblieben n = 552 verwertbare Datensätze der insgesamt 859 Kläranlagen in BW. Die Gesamtheit der 552 Datensätze repräsentiert damit ca. 64 % der Anzahl der Kläranlagen in BW. Zum Vergleich: die Datengrundlage im ersten Strukturbericht der DWA Plattform P-Rück betrug nur 349 Datensätze. Die zur wissenschaftlichen Datenanalyse vorhandene Grundgesamtheit von 552 KA-Datensätzen kann somit als sehr gut bezeichnet werden (Konfidenzintervall: 99 %; Fehlerspanne 3 %), so dass grundsätzlich statistisch valide Aussagen, insbesondere hinsichtlich Relationen und Korrelationen, getroffen werden können.

Dennoch ist festzustellen, dass innerhalb der Kläranlagen-Größenklassen die Repräsentativität der Datensätze, in denen statistisch verwertbare P-Daten (Phosphorgehalte im Klärschlamm) vorhanden sind, unterschiedlich hoch ist (vgl. **Tabelle 7**). Dies wird durch den Erfassungsgrad ( $\xi$ ) der KAen-Anzahl bzw. durch das Konfidenzniveau und die Fehlerspanne in der jeweiligen GK ausgedrückt. Es wird deutlich, dass die GK 1 mit nur 14 % (Konfidenzintervall: 80 %, Fehlerspanne: 10 %) aller in BW vorhandenen KAen dieser GK unterrepräsentiert ist. Die GK 2 wird mit nur 52 % offensichtlich zufriedenstellend repräsentiert. Die größeren – und für die meisten Betrachtungen entscheidenden – GKs, insbesondere 4 und 5, werden sehr gut (Erfassungsgrade um 90 %) durch die vorhandenen Datensätze repräsentiert.

*Tabelle 7: Nominelle und relative Anzahl der Kläranlagen sowie statistische Datenqualität*

Größenklasse	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4A	GK 4B	GK4	GK 5	GK 4+5	GK 1-5
Anzahl KAen P-Daten stat. Verwertbar	23	110	111	228	46	274	34	308	552
Anzahl KAen in BW	160	212	143	255	51	306	38	344	859
Anteil KAen an KA-Gesamtanzahl in BW	19%	25%	17%	30%	6%	36%	4%	40%	100%
Statistische prozentuale Erfassung Anzahl ( $\xi$ )	14%	52%	78%	89%	90%	90%	89%	90%	64%
Konfidenzniveau (allg. Standard: 95%)	80%	95%	95%	99%	99%	99%	99%	99%	99%
Fehlerspanne (allg. Standard: 5 %)	~10%	~6%	~1%	~3%	~5%	~2%	~8%	~2%	~3%

### 4.2 Phosphorgehalt in den Klärschlämmen

Zunächst lassen sich folgende statistische Basisaussagen bezüglich des Phosphorgehalts in den Klärschlämmen der Kläranlagen in BW treffen:

- Arithmetischer Mittelwert: 26,6 g P/kg TM
- Median: 26,3 g P/kg TM
- Standardabweichung: 7,7 g P/kg TM

Der Wert der Standardabweichung weist bereits auf eine moderate Streuung der einzelnen P-Gehalte um den arithmetischen Mittelwert hin an. Die Analyse auf Normalverteilung ergab jedoch, dass ca. 75 % aller angegebenen Phosphorgehalte – folglich über zwei Drittel der Werte – innerhalb der Entfernung der einfachen Standardabweichung zum Mittelwert liegen. Damit gelten die Daten als normalverteilt, auch wenn die Verteilungskurve eine gewisse Schiefe hin zu höheren Phosphorgehalten aufweist.

Die Datenerhebung im Rahmen des „Status quo und Strukturkonzept der Klärschlamm Entsorgung und Phosphor-Rückgewinnung in Baden-Württemberg“ der Plattform P-Rück ergab mit Daten aus dem Jahr 2018 mit einem Mittelwert und Median von ca. 25 g P/kg TM übrigens geringere Werte.

**Abbildung 1** zeigt die Summenkurve der in den Klärschlämmen gemessenen Phosphorgehalte (n = 552) über alle Kläranlagen-Größenklassen (GK 1 bis GK 5). Nur ca. 17 % (rechnerisch: 17,4 %) der Kläranlagen produzieren Klärschlämme, deren Phosphorgehalt unterhalb 20 g P/kg TM liegt. Dies bedeutet, dass ca. 83 % (rechnerisch: 82,6 %) der baden-württembergischen Klärschlammherzeuger formal zur Phosphorrückgewinnung verpflichtet sein werden.

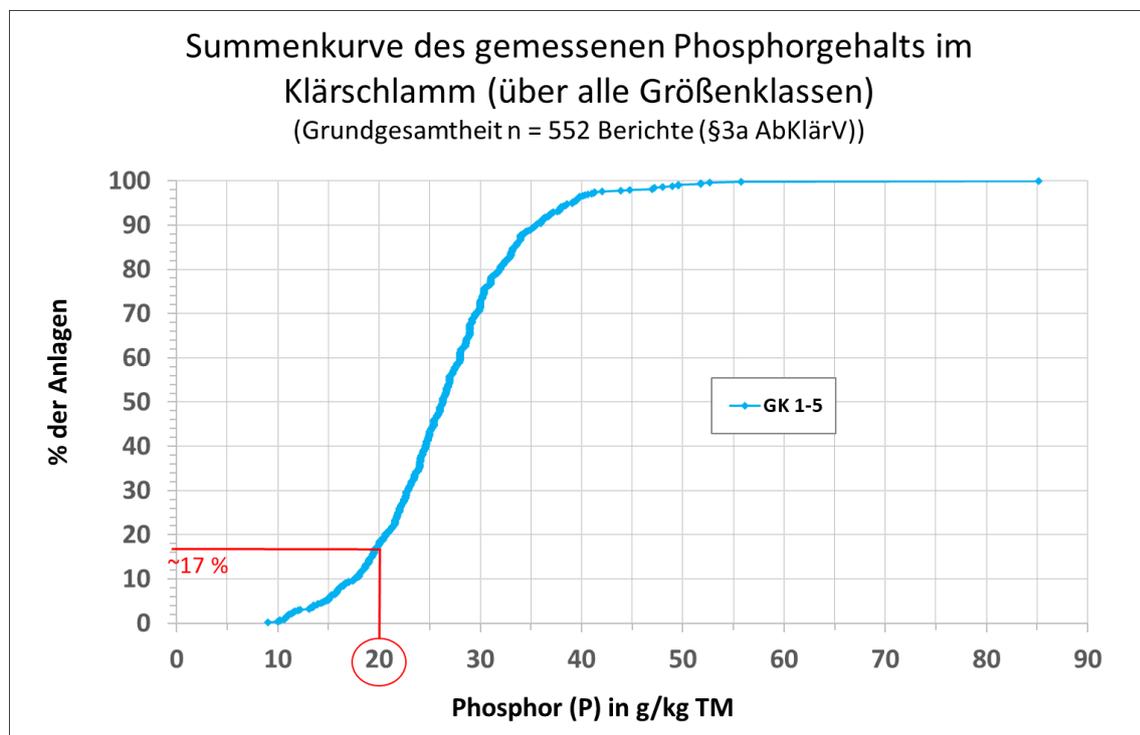


Abbildung 1: Summenkurve der in den baden-württembergischen Klärschlämmen gemessenen Phosphorgehalte – über alle Größenklassen

In ähnlicher Weise zeigt **Abbildung 2** die in den Klärschlämmen gemessenen Phosphorgehalte (n = 552), jedoch differenziert nach den Kläranlagen-Größenklassen GK 1, GK 2, GK 3, GK 4 und GK 5. Größenklassenscharf ergibt sich dadurch folgendes Bild: Die Schlämme von Kläranlagen der kleineren Größenklassen 1 und 2 unterschreiten den Grenzwert von 20 g P/kg TM statistisch weitaus häufiger als die Schlämme von KAen der Größenklassen 3, 4 und 5. Jedoch ist bei dieser Aussage die Repräsentativität der Daten innerhalb der Größenklassen zu beachten; die Kläranlagen der GK 1 und GK 2 sind im Vergleich zu den GK 3 bis 5 unterrepräsentiert (vgl. Kapitel 4.1). Es ergeben sich für die Größenklassen folgende statistische Unterschreitungshäufigkeiten des P-Rück-Grenzwerts von 20 g P/kg TM:

- GK 1: ca. 66 %
- GK 2: ca. 36 %
- GK 3: ca. 15 %
- GK 4: ca. 8 %
- GK 5: ca. 6 %

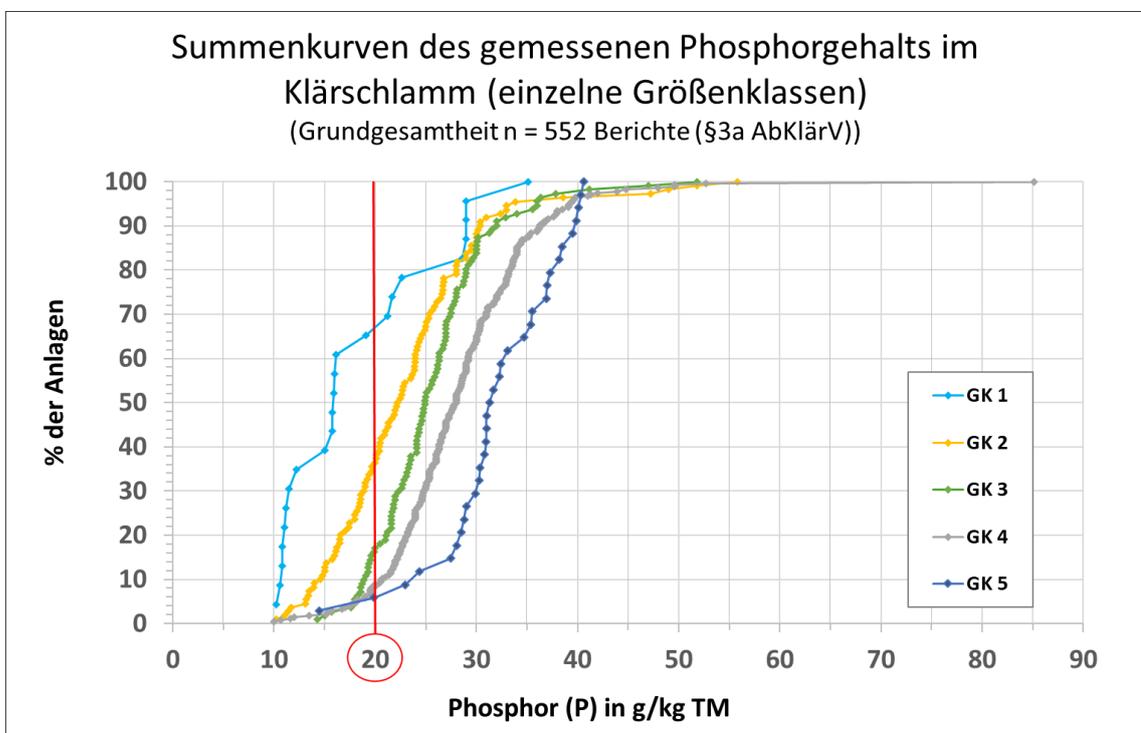


Abbildung 2: Summenkurve der in den baden-württembergischen Klärschlämmen gemessenen Phosphorgehalte – differenziert nach Größenklassen

### 4.3 Klärschlämme mit einem Phosphorgehalt im Grenzbereich von 20 g P/kg TM

Die nachfolgenden Ausführungen sollen lediglich zur Unterstützung von Überlegungen dienen, wie Klärschlammherzeuger, deren Schlämme P-Gehalte im „grenzwertnahen“ Bereich von 20 g P/kg TM aufweisen, zukünftig in der Vollzugspraxis behandelt werden können. Diesbezüglich könnte die voraussichtliche Anzahl betroffener Kläranlagen von Interesse sein.

**Abbildung 3** und **Abbildung 4** zeigen die entsprechenden statistischen Auswertungen in Diagrammform. Wird als „Grenzbereich“ 19,0–21,0 g P/kg TM definiert, so werden insgesamt ca. 8 % der Gesamtheit der baden-württembergischen Kläranlagen betroffen sein (entspricht ca.  $859 \times 0,08 = 69$  Anlagen). Wird dagegen als „Grenzbereich“ 19,5–20,5 g P/kg TM definiert, so werden insgesamt nur ca. 4 % der Kläranlagen betroffen sein (entspricht ca.  $859 \times 0,04 = 34$  Anlagen).

Weitere Ergebnisse, differenziert nach Größenklassen, sind **Tabelle 8** zu entnehmen. Hinsichtlich der „Grenzbereiche“ werden anteilig bzw. nominell die Größenklassen 1, 4B und 5 weniger als die Größenklassen 2, 3 und 4A betroffen sein. Beispielsweise sind vom „Grenzbereich“ 19,0–21,0 g P/kg TM ca. 14 % (entspricht 29 Anlagen) der Kläranlagen der GK 2, ca. 9 % (entspricht 13 Anlagen) der Kläranlagen der GK 3 und 6 % der der Kläranlagen der GK 4A (entspricht 16 Anlagen) betroffen. Insbesondere scheinen also vermehrt Klärschlämme der Kläranlagen der GK 2, welche i. A. geringeren Anforderungen an die Phosphorelimination unterworfen sind, in den „Grenzbereichen“ zu liegen. Zu beachten ist jedoch, dass Kläranlagen der GK 1 und GK 2 im Vergleich zu Kläranlagen der GK 3 bis 5 unterrepräsentiert sind (vgl. Kapitel 4.1).

Tabelle 8: Kläranlagen mit Klärschlämmen im Grenzwertbereich von 20 g P/kg TM

Größenklassen	GK 1	GK 2	GK 3	GK 4A	GK 4B	GK 4	GK 5	GK 4+5	GK 1-5
Anzahl KA (statistisch verwertbar)	23	110	111	228	46	274	34	308	552
Anzahl KA (in BW)	160	212	143	255	51	306	38	344	859
P-Gehalt: 19,0-21,0 g P/kg TM (Anzahl stat. Verwertbar)	1	15	10	14	0	14	1	15	41
P-Gehalt: 19,0-21,0 g P/kg TM (Anteil)	4%	14 %	9%	6%	0%	5%	3%	5%	8%
P-Gehalt: 19,0-21,0 g P/kg TM (Anzahl KA in BW)	7	29	13	16	0	16	1	17	64
P-Gehalt: 19,5-20,5 g P/kg TM (Anzahl stat. Verwertbar)	0	8	5	8	0	8	1	9	22
P-Gehalt: 19,5-20,5 g P/kg TM (Anteil)	0%	7%	5%	4%	0%	3%	3%	3%	4%
P-Gehalt: 19,5-20,5 g P/kg TM (Anzahl KA in BW)	0	15	6	9	0	9	1	10	34

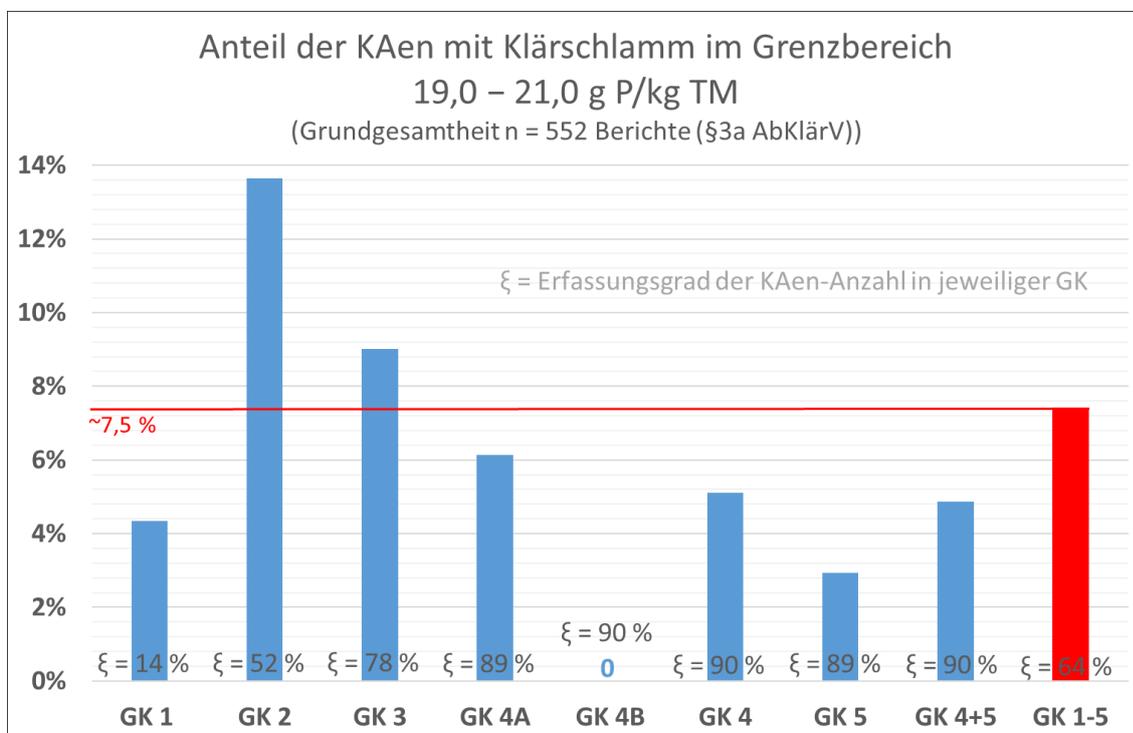


Abbildung 3: Anteil der Kläranlagen, deren Klärschlämme Phosphorgehalte im „Grenzbereich“ 19,0–21,0 g P/kg TM aufweisen

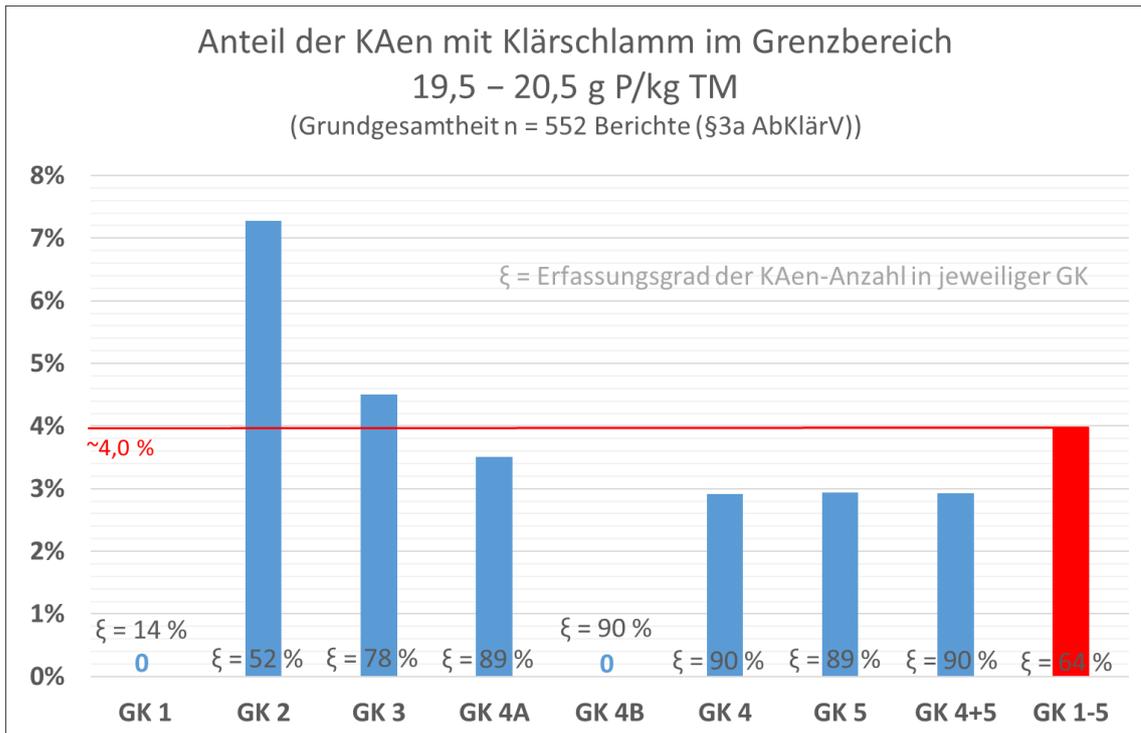


Abbildung 4: Anteil der Kläranlagen, deren Klärschlämme Phosphorgehalte im „Grenzbereich“ 19,5-20,5 g P/kg TM aufweisen

Auch ist festzustellen, dass die im „Grenzbereich“ 19,0–21,0 g P/kg TM liegenden Anlagen zu ca. 75 % (49 von 64 Anlagen) den Größenklassen 1 bis 3 angehören und mit 7 % nur unwesentlich zum Phosphorrückgewinnungs-Potenzial beitragen (vgl. Kapitel 4.4). Abgesehen davon werden sich die Betreiber dieser Anlagen mit hoher Wahrscheinlichkeit ohnehin einer Klärschlammmentsorgung mittels Klärschlammverbrennung (MonoV) anschließen.

Wie in der Literatur bereits beschrieben, ist der P-Gehalt im Klärschlamm unterschiedlich starken Schwankungen unterworfen. Im Rahmen der Berichtspflicht gaben 199 Kläranlagen mehr als ein Analyseergebnis für den P-Gehalt des Klärschlammes ab. Von diesen 199 Kläranlagen gab es 31 Kläranlagen, deren P-Gehalt in den verschiedenen Analysen mal unter und mal über den 20 g P/kg TM lag. Um die Tragkraft dieser Beobachtung gerade für Klärschlämme im Grenzwertbereich um 20 g P/kg TM näher zu beleuchten, wurden beispielhaft fünf Kläranlagen der Größenklassen 4 und 5 herausgesucht, bei denen der Minimalwert unter 20 g P/kg TM liegt, vgl. **Tabelle 9**. Die Maximalwerte hingegen liegen bei allen ausgesuchten Kläranlagen deutlich über dem Grenzwert.

Tabelle 9: Beispiele zu angegebenen P-Gehalten in Klärschlämmen

KA	Größenklasse	Anzahl Messungen	Min [g P/kg TM]	Mittel [g P/kg TM]	Max [g P/kg TM]
A)	4A	2	16,9	19,6	22,3
B)	4A	4	13,0	21,8	27,0
C)	4B	4	19,5	22,0	23,2
D)	4B	24	11,5	31,1	41,1
E)	5	4	18,8	19,9	20,8

Im Bericht 2023 wurde die Angabe des P-Gehaltes im Klärschlamm, nach den Bestimmungen der AbklärV, aus nur einer Klärschlammanalyse gefordert, die nicht älter als ein Jahr sein durfte. Bei Betrachtung von nur einem Messwert ist jedoch nicht klar, wo dieser Wert im Schwankungsbereich

aller Werte liegt: Er kann nahe dem Minimalwert, dem Mittelwert oder dem Maximalwert liegen und bereits bei der nächsten Messung erheblich abweichen.

Die statistisch ermittelten Summenhäufigkeiten beruhen somit weitgehend auf Einzelwerten (Stichproben). Für die Umsetzung der P-Rückgewinnungspflicht ab 2029 ist also noch zu klären, welche Messhäufigkeit bei den Proben zum Nachweis des P-Gehaltes gesetzlich gefordert wird. In diesem Gesamtkontext sollte auch geklärt werden, wie der in der AbfKlärV genannte Phosphor-Grenzwert im Klärschlamm von 20 g P/kg TM mathematisch zu interpretieren ist. Ist beispielsweise der Nominalwert 20 gleichbedeutend mit 20,0? Sind demzufolge im Klärschlamm ermittelte Werte zwischen 19,5 und 20,4 auf 20 auf- bzw. abzurunden?

Darüber hinaus sollte auch die Zuverlässigkeit der in der Praxis ermittelten P-Gehalte in Bezug auf deren Genauigkeit berücksichtigt werden. Hierbei spielen die Probenahme (Art und Stelle), die Probenvorbereitung (Aufschlussmethode) und die Analytik (Bestimmungsmethode) in Kombination eine entscheidende Rolle.

#### **4.4 Phosphorrückgewinnungs-Potenzial**

Der gesamte jährliche Phosphorbedarf (Dünge-, Futter-, Lebensmittel etc.) in BW wird auf ca. 12.000 t P/a geschätzt. Das gesamte jährliche Phosphoraufkommen durch die baden-württembergischen Klärschlämme beträgt derzeit ca. 6.460 t P/a. Würde die gesamte in kommunalen Klärschlämmen enthaltene Phosphormenge recycelt, betrüge das theoretische P-Bedarfs-Deckungspotenzial folglich ca. 50 %. Unter Berücksichtigung logistischer und technischer Einflüsse (Verluste, Wirkungsgrade technischer Rückgewinnungsverfahren) könnte eine realistische Phosphor-Bedarfs-Deckung von 30–40 % erreicht werden.

In **Abbildung 5** ist der Beitrag der baden-württembergischen Kläranlagen zum Phosphor-Rückgewinnungspotenzial dargestellt. Es ist deutlich ersichtlich, dass die Klärschlämme der Kläranlagen der GK 4 und 5 (Anzahl: 344) mit insgesamt ca. 93 % (entspricht derzeit ca. 6.060 t P/a) den größten Anteil am Phosphorpotenzial haben. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Kläranlagen der GK 1 bis 3 (Anzahl: 515 bzw. Anteil an Kläranlagengesamtanzahl: 60 %) nur ca. 7 % zum Phosphorpotenzial beitragen. Vor diesem Hintergrund könnten Überlegungen angestellt werden, wie der Vollzug der AbfKlärV (Berichte, Veranlagung zur P-Rückgewinnung etc.) im Sinne der Minimierung des behördlichen Verwaltungsaufwands möglichst einfach und effektiv gestaltet werden kann (vgl. Kapitel 7.3.2). Wie bereits oben erwähnt, werden sich die vielen kleineren Kläranlagen ohnehin überwiegend einer Klärschlamm Entsorgung mittels Klärschlammverbrennung als Dienstleistung anschließen.

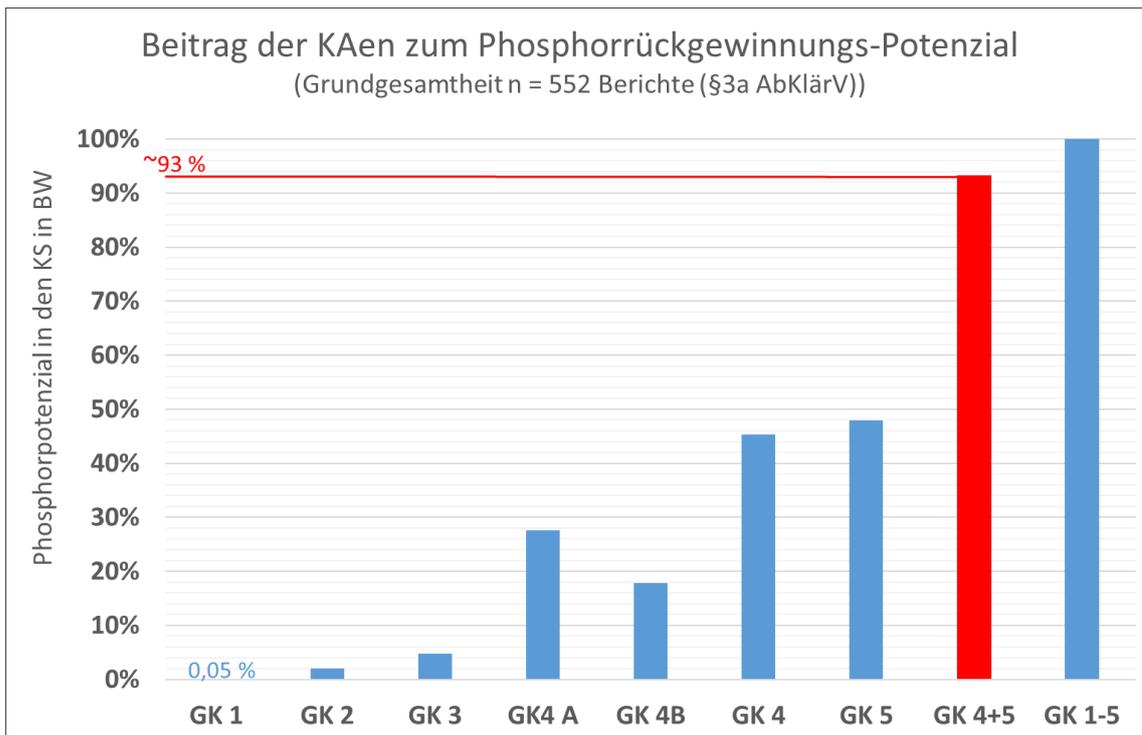


Abbildung 5: Beitrag der Kläranlagen in BW zum Phosphor-Rückgewinnungspotenzial

#### 4.5 Zusammenhang zwischen der Art der Schlammbehandlung und dem Phosphorgehalt im Klärschlamm

Mit weiteren statistischen Auswertungen und Tests wurde untersucht, ob ein kausaler Zusammenhang zwischen den grundsätzlichen Arten der Schlammbehandlung

- simultane aerobe Schlammbehandlung (SAeS)
- getrennte anaerobe Schlammbehandlung (GAnS)

und der mittleren Konzentration von Phosphor im Klärschlamm existiert.

Als Datengrundlage für die Berechnungen dienten die in der Zentraldatei zusammengeführten arithmetischen Mittelwerte des Phosphorgehalts im Klärschlamm (Berichtsdaten nach § 3a AbfklärV). Diese Berichtsdaten mussten jedoch weiter plausibilisiert bzw. bereinigt werden: Eliminiert wurden Datensätze mit der unplausiblen Angabe, dass Schlamm beiden oder keiner der o. g. Behandlungsarten unterzogen wurde. Es verblieben 429 verwertbare Datensätze (196 aerobe Stabilisierungsanlagen (SAeS) sowie 233 anaerobe Stabilisierungsanlagen (GAnS)), die ca. 50 % der 859 Kläranlagen in BW repräsentierten. Die Datengrundlage hatte sich somit im Vergleich zur Datenbasis, die für die vorangegangenen Auswertungen verwendet wurde, um ca. 14 %-Punkte reduziert. Nach wie vor ist die Datenbasis jedoch sehr gut (Konfidenzintervall: 99 %; Fehlerspanne 4 %).

**Abbildung 6** zeigt Anzahl und Verteilung der gültigen und ungültigen Datensätze innerhalb der Kläranlagen-Größenklassen. Für jede Größenklasse lag eine ausreichende Gültigkeitsquote von mindestens ca. 65 % vor. Jedoch ist zu beachten, dass die absolute Anzahl der gültigen Werte mit einer Grundgesamtheit von n = 23 in der GK 1 gering ist. Statistische Aussagen bezüglich der GK 1 sind daher mit erhöhten Unsicherheiten behaftet.

In **Abbildung 7** ist mit Hilfe von Box-Whisker-Plots<sup>9</sup> die größenklassenscharfe Verteilung der P-Gehalte dargestellt. Der Phosphorgehalt in den Klärschlämmen von KAen der GK 4 und 5 liegt tendenziell im Bereich von 30–37 g P/kg TM, wohingegen sich der Phosphorgehalt in den Klärschlämmen von KAen der GK 1 und 2 im Bereich von 15–25 g P/kg TM bewegt. Auch sind Abweichungen von den Kernbereichen, in denen die mittleren 50 % der Werte liegen erkennbar. Die Gründe für höhere P-Konzentrationen in den Klärschlämmen von KAen höherer Klassen sind eher trivialer Natur:

- höhere Anforderung an die Phosphorelimination (geringere Ablaufkonzentrationen bzw. höhere Eliminationsgrade)
- überwiegende Anwendung der anaeroben Schlammstabilisierung und demzufolge Aufkonzentration des Phosphors infolge von Masseverlust des KS bei der Umwandlung organischer Substanz in Biogas.

Letztere Aussage wird durch die in **Abbildung 8** dargestellte Auswertung belegt. Es wird die Verteilung des Phosphorgehalts in den Klärschlämmen, unterschieden nach getrennter anaerober Stabilisierung (GAnS) und getrennter aerober Stabilisierung (SAeS), dargestellt. Der P-Gehalt in GAnS-Klärschlämmen ist generell deutlich höher als in SAeS-Klärschlämmen. Größere Kläranlagen (ab Ausbaugrößen von 20.000 bis 50.000 EW) wählen in der Regel die GAnS, um Methan als verstrombaren Energieträger zu produzieren.

Innerhalb der GK 2, 3 und 4A zeigte sich zunächst ebenfalls, dass bei Anwendung der GAnS deutlich höhere Phosphorgehalte in den Klärschlämmen auftreten. Veranschaulicht wird dies durch **Abbildung 9**, welche die größenklassenscharfe Verteilung des Phosphorgehalts in den Klärschlämmen, unterschieden nach GAnS und SAeS, darstellt. Für die GK 2, 3 und 4A, in denen Kläranlagen vorkommen, die entweder GAnS oder SAeS anwenden, wurde die statistische Signifikanz der Aussage mit Hilfe des Wilcoxon-Tests überprüft. Diese Testmethode wurde gewählt, weil die Datenverteilung von der Normalverteilung abwich. Im Falle der GK 3 und 4A konnte die Nullhypothese zurückgewiesen bzw. die statistische Aussage validiert werden. Im Falle der GK 2 zeigte die Testantwort, dass (aufgrund der Datenbeschaffenheit) leider keine eindeutige Aussage gemacht werden, ob die GAnS gegenüber der SAeS zu real höheren Phosphorgehalten in den Klärschlämmen führt.

---

<sup>9</sup> Die Box entspricht dem Bereich, in dem die mittleren 50 % der Daten liegen. Sie wird durch das obere und das untere Quartil begrenzt: Die Länge der Box entspricht dem Interquartilsabstand IQR (Maß der Streuung der Daten), welches durch die Differenz des oberen und unteren Quartils bestimmt wird. Der Median ist als durchgehender Strich in der Box eingezeichnet und teilt das gesamte Diagramm in zwei Bereiche, in denen jeweils 50 % der Daten liegen. Die Lage des Medians in der Box zeigt die Schiefe der Datenverteilung (ist der Median im oberen Teil der Box, so ist die Verteilung rechtsschief, und umgekehrt). Die Länge der Whisker wurden auf das 1,5-Fache des Interquartilsabstands gesetzt. Gibt es keine Werte außerhalb der Grenze von  $1,5 \times \text{IQR}$ , wird die Länge des Whiskers durch den maximalen und minimalen Wert festgelegt. Andernfalls können Werte außerhalb der Whisker ausreißerverdächtig sein.

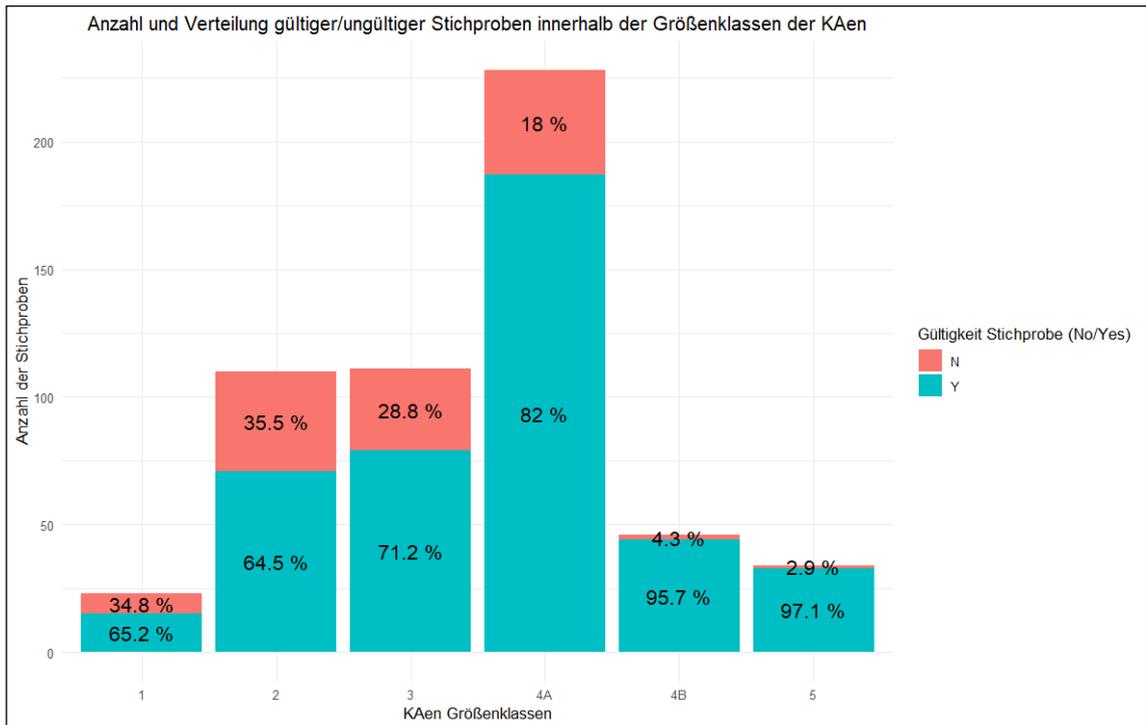


Abbildung 6: Anzahl und Verteilung der gültigen und ungültigen Datensätze zur Analyse des Einflusses der Art der Schlammbehandlung auf den Phosphorgehalt im Klärschlamm

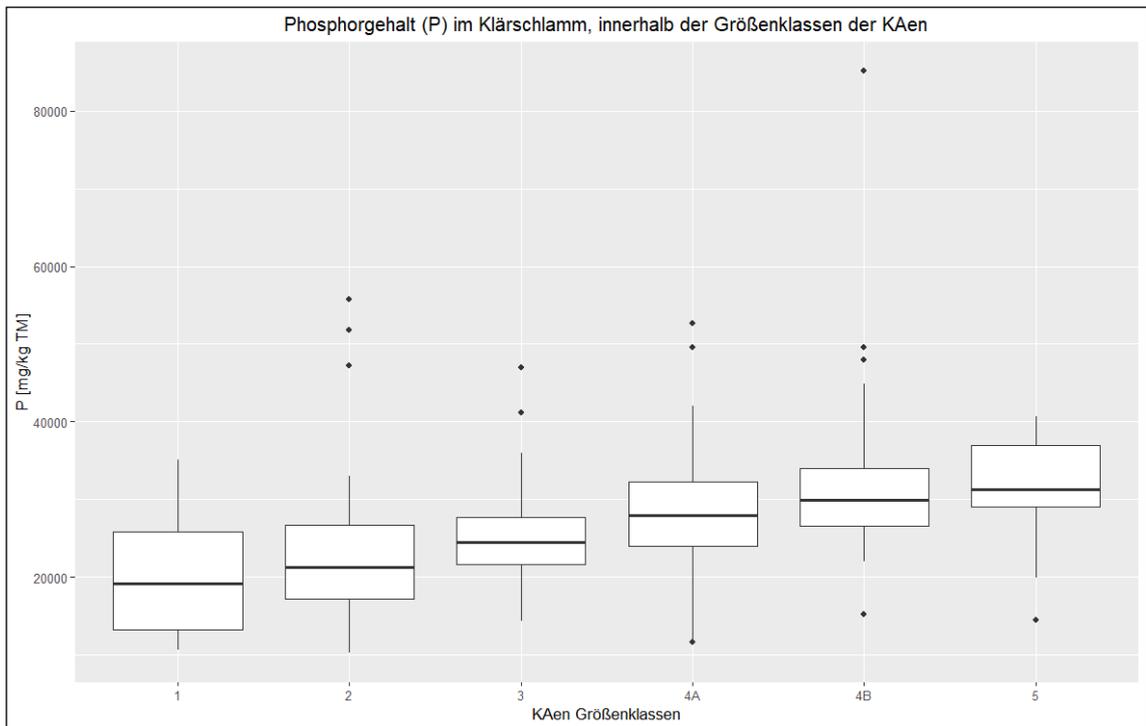


Abbildung 7: Verteilung des Phosphorgehalts im Klärschlamm, innerhalb der Kläranlagen-Größenklassen

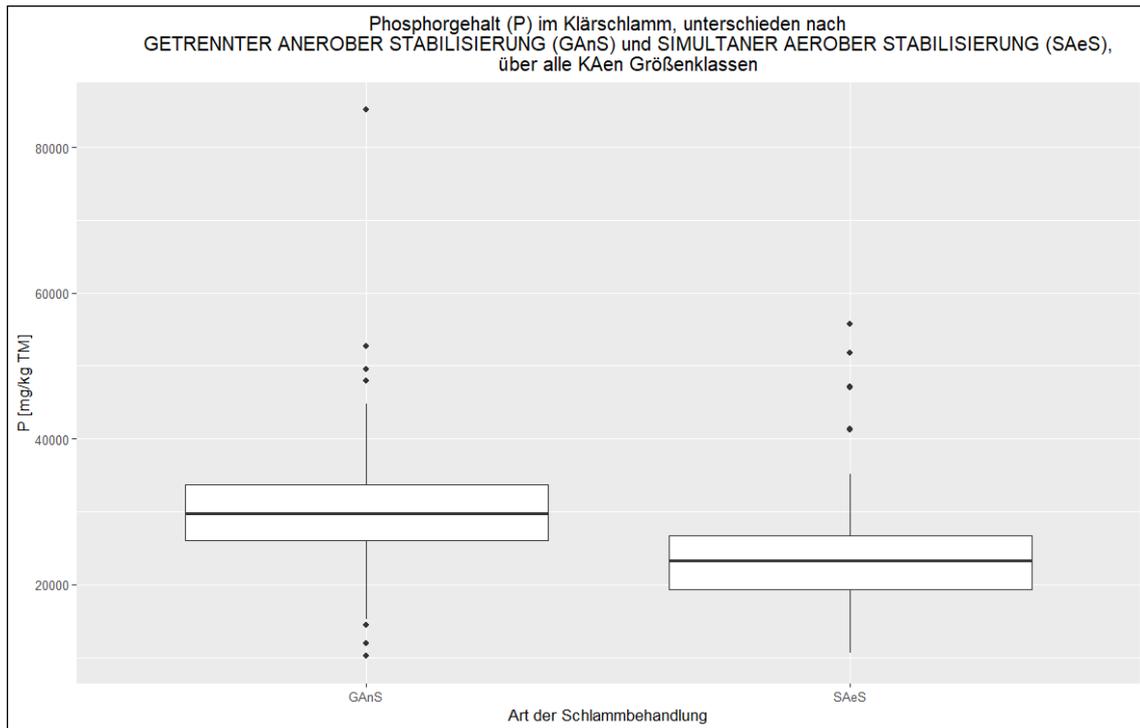


Abbildung 8: Verteilung (über alle GK) des Phosphorgehalts in den Klärschlämmen, unterschieden nach getrennter anaerober Stabilisierung (GAnS) und getrennter aerober Stabilisierung (SAeS)

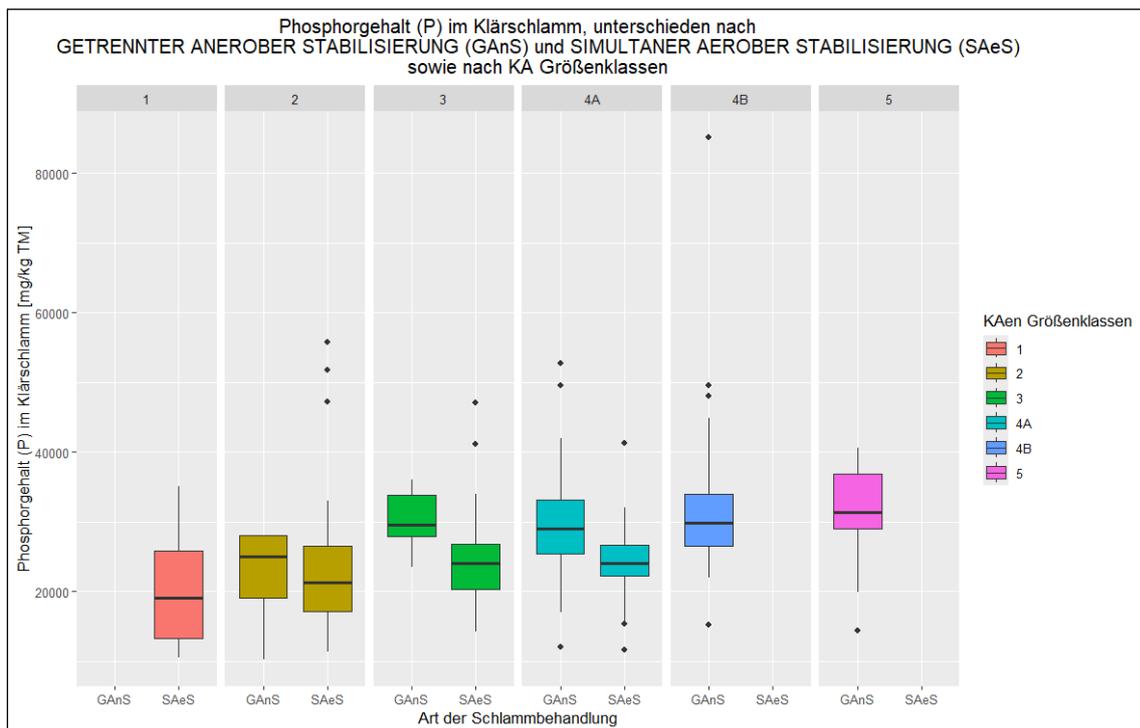


Abbildung 9: Verteilung (größenklassenscharf) des Phosphorgehalts in den Klärschlämmen, unterschieden nach getrennter anaerober Stabilisierung (GAnS) und getrennter aerober Stabilisierung (SAeS)

## 4.6 Zusammenhang zwischen der Art der Phosphorelimination und dem Phosphorgehalt im Klärschlamm

Weitere statistische Auswertungen und Tests wurden durchgeführt, um festzustellen, ob ein kausaler Zusammenhang zwischen den üblichen Arten der Phosphorelimination

- chemisch-physikalische Phosphat-Fällung mittels Wirksubstanz  $Al^{3+}$  (aus aluminiumhaltigen Verbindungen)
- chemisch-physikalische Phosphat-Fällung mittels Wirksubstanz  $Fe^{3+}$  (aus eisenhaltigen Verbindungen)
- chemisch-physikalische Phosphat-Fällung mittels Kombination der Wirksubstanzen  $Al^{3+}$  und  $Fe^{3+}$  (Mischprodukte)
- vermehrte biologische Phosphat-Elimination (Bio-P)

und der mittleren Konzentration von Phosphor im Klärschlamm existiert.

Für die statistischen Auswertungen musste die Datengrundlage weitergehend bereinigt werden. Datensätze mussten eliminiert werden, da teilweise keine oder offensichtlich falsche Angaben hinsichtlich der Art der Phosphorelimination gemacht worden waren. Letztlich verblieben 140 Datensätze von Kläranlagen mit simultaner aerober Stabilisierung (SAeS) und 111 Datensätze von Kläranlagen mit getrennter anaerober Stabilisierung (GAnS). Insgesamt werden durch die reduzierte Datenbasis ca. 30 % der 859 Kläranlagen in BW repräsentiert. Die Datenbasis ist somit als zufriedenstellend einzustufen.

Die bei der Betrachtung von Beginn an vorgenommene Unterscheidung nach SAeS- bzw. GAnS-Anlagen wurde als sinnvoll erachtet, da die Art der Schlammstabilisierung selbst einen hohen Einfluss auf den Phosphor im Klärschlamm hat (vgl. Kapitel 4.5).

**Abbildung 10** zeigt die Verteilung der Arten der Phosphorelimination auf der Grundlage der beschriebenen Datenbasis, unterschieden nach Anlagen mit aerober Stabilisierung (SAeS) und Anlagen mit anaerober Stabilisierung (GAnS). Im Falle der SAeS-Anlagen erfolgt die Phosphorelimination zu etwa gleichen Teilen mit Hilfe von Eisensalzen, Aluminiumsalzen und Mischprodukten. Bio-P-Anlagen sind nur in sehr geringer Anzahl vorhanden. Ein anderes Bild ergibt sich bei den GAnS-Anlagen, welche gleichzeitig auch die größeren Größenklassen repräsentieren. Die überwiegende Anzahl der GAnS-Anlagen verwendet Mischprodukte (ca. 49%) oder Eisensalze (ca. 37 %) Phosphorelimination. Aluminiumsalze werden weniger häufig eingesetzt (ca. 14 %). Der Grund für den überwiegenden Einsatz von Eisensalzen und Mischprodukten liegt bei den GAnS-Anlagen v. a. in den zusätzlichen positiven Wirkungen des Eisens, beispielsweise auf die  $H_2S$ -Bindung in der Faulung.

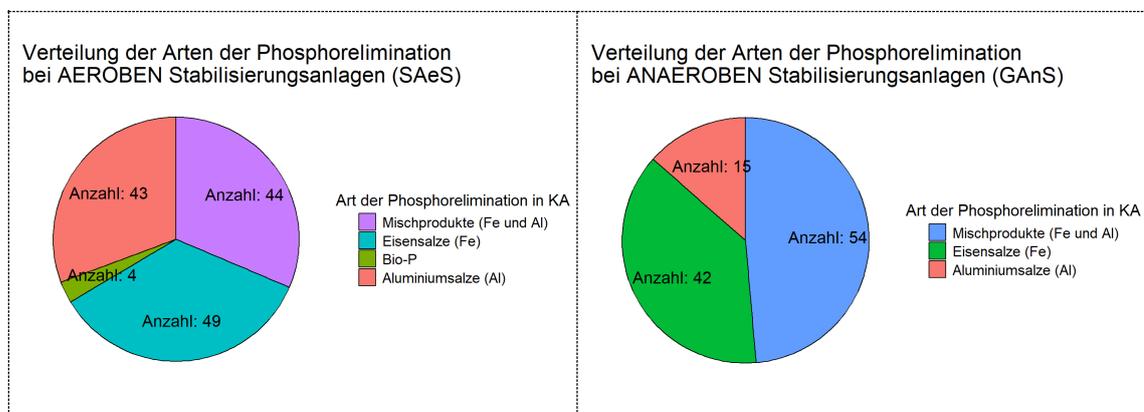


Abbildung 10: Verteilung der Arten der Phosphorelimination, unterschieden nach simultaner aerober Stabilisierung (SAeS) (links) und getrennter anaerober Stabilisierung (GAnS) (rechts)

**Abbildung 11** bzw. **Abbildung 12** zeigen den Phosphorgehalt in Abhängigkeit von der Art der Phosphorelimination in der KA, differenziert nach SAeS-Anlagen bzw. GAnS-Anlagen. Im Falle der SAeS-Anlagen führt der Einsatz von Aluminiumsalzen offenbar zu höheren P-Gehalten im Klärschlamm als der Einsatz von Eisensalzen oder die Anwendung der Bio-P; der Einsatz von Mischprodukten jedoch führt zu ähnlich hohen P-Gehalten wie der Einsatz von Aluminiumsalzen. Im Falle von GAnS-Anlagen existiert nahezu kein Unterschied im P-Gehalt der Schlämme, wenn Eisen- oder Aluminiumsalze eingesetzt werden. Wenn in GAnS-Anlagen allerdings Mischprodukte verwendet werden, ist der P-Gehalt im Schlamm um ca. 10 % höher als bei Verwendung von Eisen- oder Aluminiumsalzen. Die statistische Signifikanz der Aussagen wurde mit Hilfe des ANOVA-Tests (Varianzanalyse) überprüft. Diese Testmethode wurde gewählt, weil nun die Signifikanz des Unterschieds von Mittelwerten von mehr als 2 Gruppen untersucht wurde. Die Testergebnisse deuten darauf hin, dass die Unterschiede bezüglich des P-Gehalts im Klärschlamm zwischen den P-Eliminations-Arten statistisch signifikant sind.

Hinsichtlich der technischen Phosphorrückgewinnung (Extraktion des Phosphors aus Asche oder Klärschlamm) sind prinzipiell hohe P-Gehalte im Klärschlamm gewünscht, um hohe Wirkungsgrade der Rückgewinnungsanlagen zu erreichen und letztendlich viel Phosphor in die Kreislaufwirtschaft zu bringen. Falls Klärschlamm-Asche als Rohstoff in die konventionelle Düngemittelproduktion eingeschleust werden soll, sind aluminiumphosphathaltige Aschen im Produktionsprozess vorteilhaft. Somit kann unter dem Aspekt der P-Rückgewinnung und des P-Recyclings die allgemeine Empfehlung abgeleitet werden, den Einsatz von eisenhaltigen Fällmitteln möglichst zu reduzieren und in den Kläranlagen auf Phosphatfällung mittels aluminiumhaltiger Fällmittel oder Mischprodukte umzustellen. Hieraus möglicherweise resultierende betriebliche Nachteile in den Kläranlagen, betriebliche Kosten und negative Umweltwirkungen sind dagegen abzuwägen.

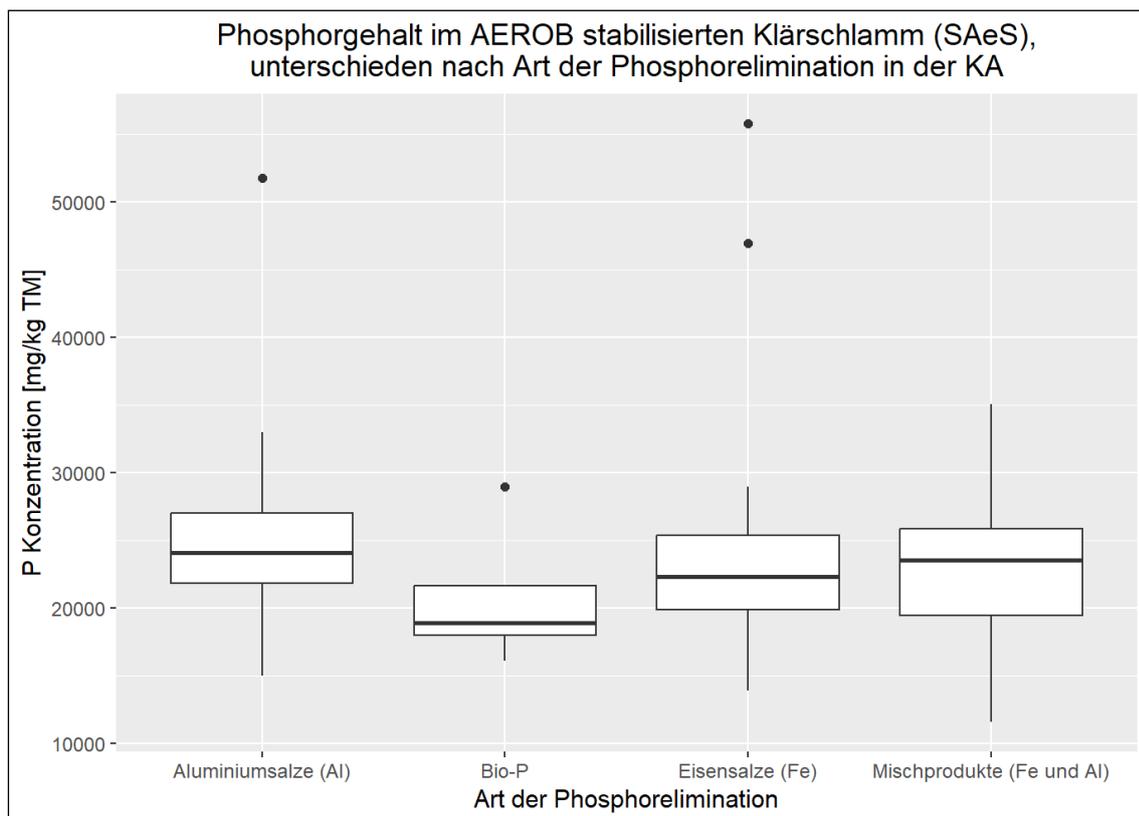


Abbildung 11: Phosphorgehalt im aerob stabilisierten Klärschlamm [SAeS], unterschieden nach Art der Phosphorelimination in der KA

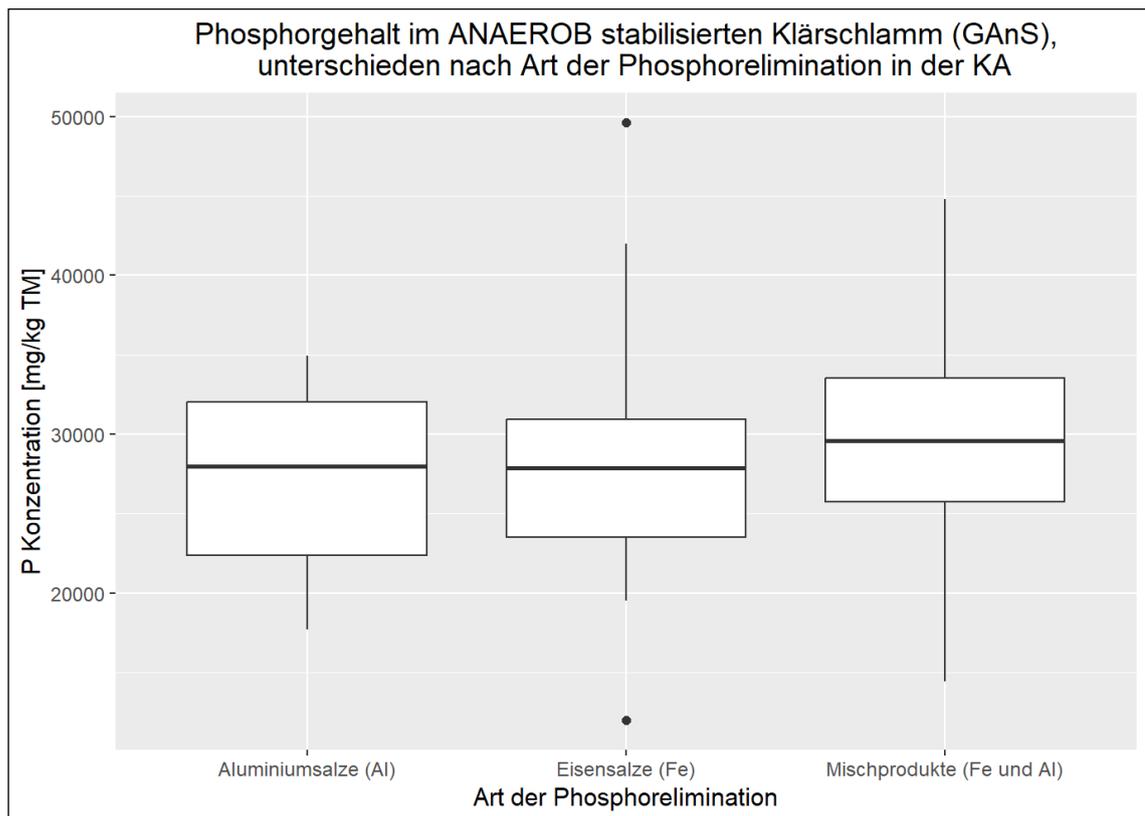


Abbildung 12: Phosphorgehalt im anaerob stabilisierten Klärschlamm (GAnS), unterschieden nach Art der Phosphorelimination in der KA

#### 4.7 Zusammenhang zwischen dem Fremdwasseranteil und dem Phosphorgehalt im Klärschlamm

Schließlich wurde überprüft, ob ein kausaler Zusammenhang zwischen dem Fremdwasseranteil und dem Phosphorgehalt im Klärschlamm existiert. Auch hierbei wurde die Unterscheidung nach SAeS- bzw. GAnS-Anlagen als sinnvoll erachtet, da die Art der Schlammstabilisierung selbst einen hohen Einfluss auf den Phosphor im Klärschlamm hat (vgl. Kapitel 4.5). Vorhanden waren 429 verwertbare Datensätze; 196 aerobe Stabilisierungsanlagen (SAeS) sowie 233 anaerobe Stabilisierungsanlagen (GAnS) (vgl. Kapitel 4.6).

Abbildung 13 und Abbildung 14 zeigen die Korrelation des Phosphorgehalts in Klärschlämmen mit dem Fremdwasseranteil im Zulauf der Kläranlage, differenziert nach SAeS-Anlagen bzw. GAnS-Anlagen. Offensichtlich nimmt in beiden Fällen die Phosphorkonzentration mit steigendem Fremdwasseranteil ab. Zusätzlich wurde auch der Zusammenhang zwischen Fremdwasseranteil und Größenklasse hergestellt (Abbildung 15). Hierbei ist ersichtlich, dass i. A. der Fremdwasseranteil mit zunehmender Größenklasse abnimmt. Dies erscheint plausibel, da in größeren Einzugsgebieten bzw. größeren Abwassersammlern die infiltrierende Fremdwassermenge gegenüber der Schmutzwassermenge geringer ist. Eine vermeintliche Scheinkorrelation zwischen Phosphorkonzentration und Fremdwasseranteil ist eher auszuschließen: Bei konzentrationsabhängigen Steuerungs-/Regelungskonzepten der Phosphatelimination und/oder bei sehr geringer Grundlasteinstellung der Fällmitteldosierung kann es im Falle einer hohen Abwasserverdünnung – gleichbedeutend mit einem hohen Fremdwasseranteil – zu Zeitperioden kommen, während denen sehr wenig oder kein Fällmittel dosiert wird und damit auch wenig bzw. kein Phosphor in den Klärschlamm gelangt. Folglich erscheint es plausibel, dass bei erhöhtem Fremdwasseranteil im Kläranlagenzulauf die mittlere P-Konzentration im Klärschlamm relativ gering ist.

Folgende Schlussfolgerung kann gezogen werden: bei zukünftig vermehrter Sanierung von Abwassersammlern und/oder Hausanschlussleitungen, muss mit einer erhöhten Phosphorkonzentration in den Klärschlämmen gerechnet werden. Dies bedeutet, dass insbesondere Kläranlagenbetreiber (Klärschlammerzeuger), deren Klärschlämme bisher knapp unter dem P-Rück-Grenzwert von 20 g P/kg TM liegen, P-rückgewinnungspflichtig werden könnten, wenn im Einzugsgebiet Kanalsanierungsarbeiten mit dem Effekt der Fremdwasserreduzierung durchgeführt wurden und werden.

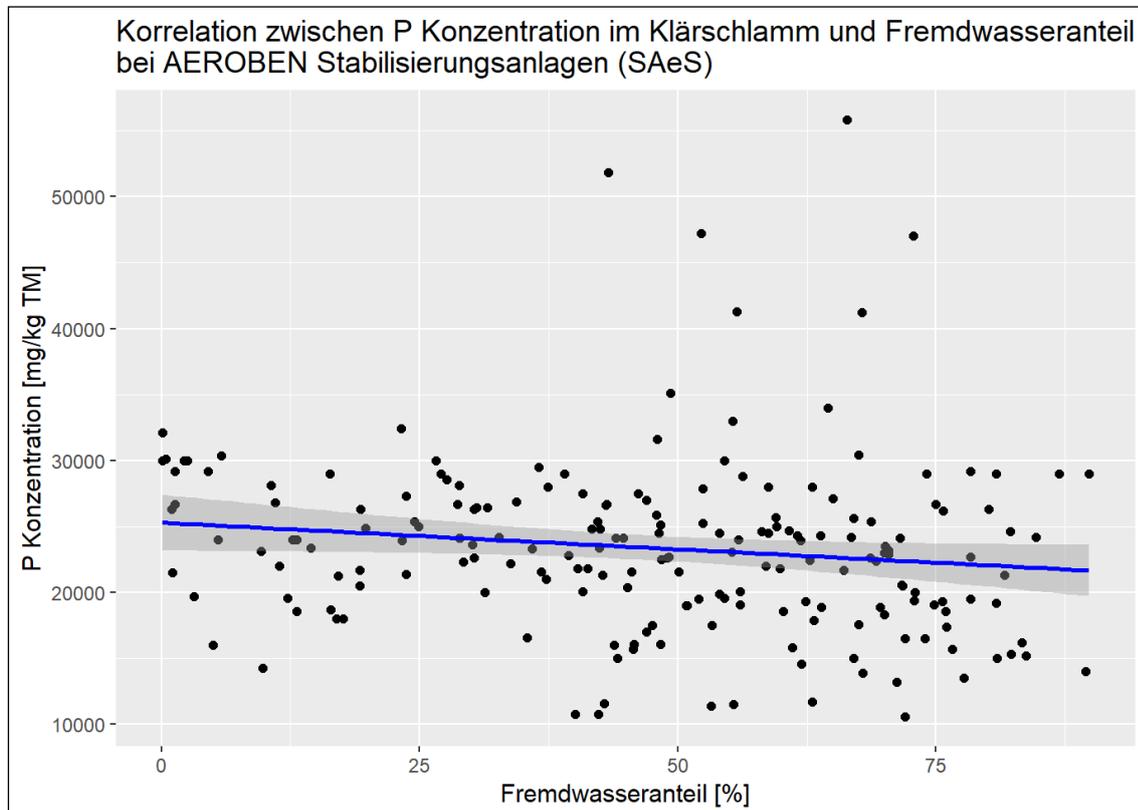


Abbildung 13: Korrelation des Phosphorgehalts im aerob stabilisierten Klärschlamm (SAeS) mit dem Fremdwasseranteil (FWA)

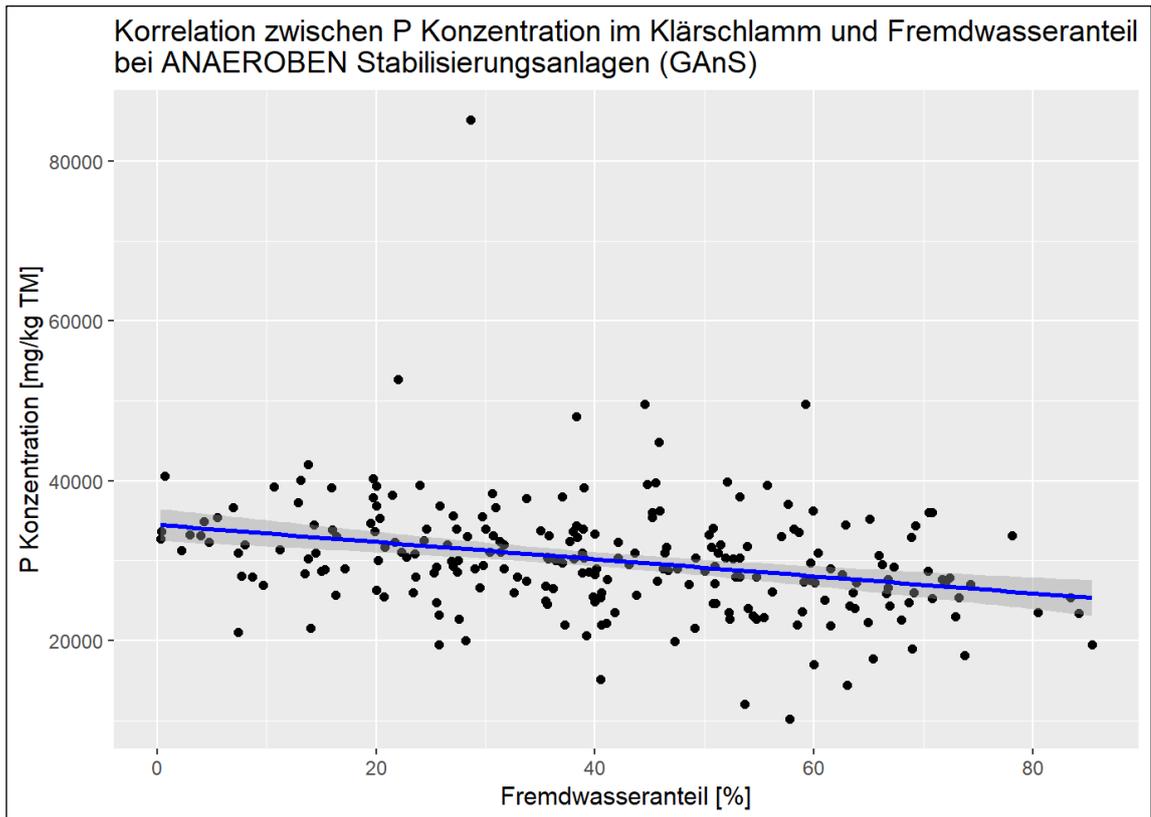


Abbildung 14: Korrelation des Phosphorgehalts im anaerob stabilisierten Klärschlamm (GAnS) mit dem Fremdwasseranteil (FWA)

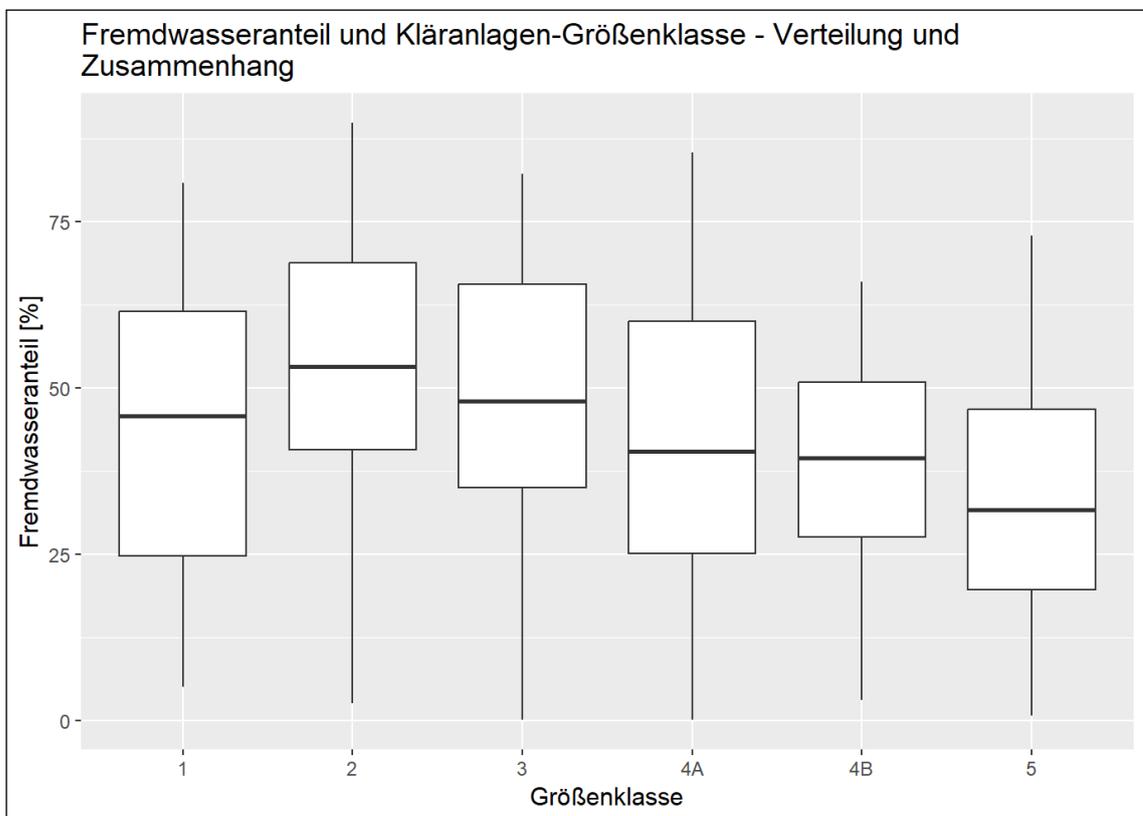


Abbildung 15: Fremdwasseranteil und Kläranlagen-Größenklasse - Verteilung und Zusammenhang

## **5 Aktuelle Projekte zum Bau von Klärschlammverbrennungsanlagen und P-Rückgewinnungsanlagen in Baden-Württemberg**

### **5.1 Überblick**

Zur Sicherstellung einer langfristig tragfähigen Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung in Baden-Württemberg hatte das Umweltministerium mit Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) und aus Landesmitteln das „Förderprogramm Phosphorrückgewinnung 2014-2020“ aufgelegt. Mit den Fördermitteln wurden insgesamt drei großtechnische Versuchsanlagen zur P-Rückgewinnung errichtet:

- MAP-Anlage in Göppingen (nasschemisches P-Rückgewinnungsverfahren aus Faulschlamm), Inbetriebnahme im Jahr 2019
- MVV Mannheim (integratives thermochemisches Verbrennungsverfahren "Euphore" im Drehrohr), Inbetriebnahme voraussichtlich im 1. Halbjahr 2025
- Breisach/AZV Staufener Bucht (integratives thermochemisches Verbrennungsverfahren "P-Xtract" in der Wirbelschicht), Inbetriebnahme im Herbst 2024

Über diese mit Fördermitteln erstellten Anlagen hinaus gibt es weitere laufende Planungen zum Bau neuer Klärschlammverbrennungsanlagen in

- Böblingen (Zweckverband kbb)
- Forchheim am Kaiserstuhl (KZV Südbaden)
- Bonndorf (KomPhoS GmbH / TTS Stulz)
- Walheim (EnBW)

Über den aktuellen Entwicklungsstand dieser Planungen soll im Folgenden kurz berichtet werden.

### **5.2 MAP-Anlage in Göppingen / Stadtentwässerung Göppingen (SEG)**

Auf der Kläranlage Göppingen (Landkreis Göppingen) wurde im Sommer 2019 eine großtechnische Versuchsanlage (AirPrex®) zur nasschemischen Rückgewinnung von Phosphor aus Faulschlamm in Form von MAP (Struvit) mit EFRE- und Landesfördermitteln des Förderprogrammes des Umweltministeriums errichtet.

Anlagentechnisch hat die Versuchsanlage in Göppingen ihre Funktionstüchtigkeit mit den Nachrüstungen eines/einer

- Aktivkohle-Filter (Abluft)
- Schlammsiebung
- Hydrozyklons

unter Beweis gestellt.

Jedoch zeigte sich, dass das gewählte technische P-Rückgewinnungsverfahren u. a. aufgrund des stark variierenden ortho-Phosphatgehalts im Faulschlamm und der Güte der Schlammdesintegration nur sehr aufwändig zu kontrollieren bzw. zu beherrschen ist.

Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass für die Gewinnung des Phosphors in Form von Struvit weniger die Fällungsrate ein Problem darstellt als vielmehr die Abscheiderate. Weder durch betriebstechnische Maßnahmen noch durch Nachrüstung eines Hydrozyklons zur Verbesserung der

Kristallisation und der damit verbundenen Abscheiderate von Struvitkristallen ist es gelungen, Phosphor in zufriedenstellendem Maße aus dem Klärschlamm zurück zu gewinnen.

Der Abschlussbericht ist unter <https://www.goepingen.de/20402451.html> auf der Homepage der SEG Göppingen unter dem Stichwort "Projekte" veröffentlicht.

Obwohl zurzeit weitere Optimierungsmaßnahmen an der Anlage durchgeführt werden, bleibt fraglich, ob der Grenzwert der Klärschlammverordnung von 20 g P/kg TM zu jeder Zeit sicher auf diesem Weg unterschritten werden kann.

### **5.3 MVV Mannheim (Müllheizkraftwerk)**

In der kreisfreien Stadt Mannheim ist die MVV Umwelt Asset GmbH dabei, die auf dem Gelände des Müllheizkraftwerkes mit Fördermitteln des Förderprogramms errichtete thermochemische Phosphorrückgewinnungsanlage nach dem EuPhoRe®-Verfahren in Betrieb zu nehmen.

Die Anlage besteht im Endausbau aus zwei Drehrohröfen, die im Seitenstrom zu den mit Abfall befeuerten Müllkesseln MK4 und MK6 angeschlossen sind. Beide Drehrohre zusammen sollen eine Verbrennungskapazität von zusammen 135.000 t/a OS (ca. 37.500 t/a TM) erreichen.

Mit der Anlage sollen ausschließlich kommunale Klärschlämme behandelt werden. Die thermische Verwertung des entwässerten Klärschlammes soll unter Zugabe von wasserlöslichen Alkali- und Erdalkalichloriden (z. B. Kaliumchlorid, Magnesiumchlorid) nach dem EuPhoRe-Verfahren erfolgen, wodurch die Asche gezielt im Sinne der zukünftig geforderten P-Rückgewinnung modifiziert wird:

- Der in der Asche enthaltene Phosphor wird in eine verbessert pflanzenverfügbare Form umgelagert, so dass die Düngewirksamkeit der Asche verbessert wird.
- Schwermetalle werden in Anwesenheit der Additive verstärkt über die Rauchphase ausgeschieden und die Asche somit von diesen Schwermetallen entfrachtet, was zu einem geringeren Schadstoffgehalt der düngewirksamen Asche führt und somit die Qualität verbessert.

Beide Effekte, die die Nutzung der Asche als Direktdüngemittel und somit die stoffliche P-Rückgewinnung begünstigen, machen die Klärschlammverbrennung zu einem "integrativen" Verfahren, das die thermische Verwertung und die P-Rückgewinnung in einem Prozess zusammenführt.

Der Stand des Anlagenbetriebes zum Jahresende 2023 wird im EFRE-Abschlussbericht vom 18.10.2023 auf der Homepage der MVV unter [diesem Link](#) beschrieben.

Der Drehrohröfen I am Müllkessel 6 wurde Ende März 2023 kalt in Betrieb genommen und eine Versuchsmenge Klärschlamm probeweise am 20. und 21. März 2023 thermisch behandelt, um die benötigten Versuchsmengen an Phosphataschen für den im Rahmen des EFRE-Vorhabens geforderten Vegetationsversuch zu erzeugen.

Parallel zu Drehrohr I ist der Bau von Drehrohr II am Müllheizkessel 4 erfolgt. Die Abnahme dieses Drehrohrs war nach Angaben der MVV im 4. Quartal 2024 geplant.

### **5.4 P-Xtract / AZV Staufferer Bucht (KA Grezhausen)**

Ebenfalls mit Mitteln des EFRE-Förderprogramms wurde auf der Kläranlage Grezhausen des AZV Staufferer Bucht (Nähe Freiburg, Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald) eine kleinere, dezentrale (regionale) Klärschlammverbrennungsanlage errichtet, die im Mai 2024 ihre Warm-Inbetriebnahme gestartet hat.

Für den Bau und Betrieb der Verbrennungsanlage haben sich sieben Kläranlagenbetreiber im Rahmen eines öffentlich-rechtlichen Vertrags zur Klärschlammverwertungsgemeinschaft Neuenburg-Breisach zusammengeschlossen.

Die Pilotanlage nach dem innovativen P-Xtract-Verfahren hat eine Nennkapazität von ca. 11.000 t/a OS<sub>25%</sub> (ca. 30 t/d OS<sub>25%</sub> bzw. ca. 10 t/d TM) bei einer Leistung von ca. 1 MW<sub>therm</sub>.

Die verfahrenstechnische Besonderheit liegt auch hier in der Zugabe von Alkali-Additiven (Natrium/Kalium) und der speziellen Eigenschaft des Wirbelbetts bei Verbrennung des entwässerten Klärschlammes in der stationären Wirbelschicht. Die Abscheidung der Phosphor-angereicherten Asche erfolgt über einen Heißzyklon.

Die Zugabe von Additiven soll auch hier zur Gewinnung einer Phosphor-reichen Asche mit guter Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors bei gleichzeitig reduziertem Schwermetallgehalt führen. Insofern handelt es sich auch hier um ein thermochemisches, integratives Verbrennungsverfahren mit integrierter P-Rückgewinnung.

Die feierliche Inbetriebnahme hat am 19. September 2024 stattgefunden. Einblicke in den aktuellen Stand von Bau und Betrieb der Anlage können unter <https://azv-staufener-bucht.de/p-xtract/> auf der Homepage des AZV Staufener Bucht eingesehen werden.

## **5.5 ZV Restmüllheizkraftwerk Böblingen (rbb)**

Seit 1999 betreibt der Zweckverband Restmüllheizkraftwerk Böblingen (ZV rbb) das Heizkraftwerk (2 Kessel, Durchsatz 167.965 t/2023) für seine Verbandsmitglieder, die Landkreise Böblingen, Calw, Esslingen, Freudenstadt und Rottweil sowie die Landeshauptstadt Stuttgart.

Im November 2020 gründete sich in Böblingen (Landkreis Böblingen) der Zweckverband Klärschlammverwertung Böblingen (ZV kbb). Im Zweckverband bündeln 76 Kommunen und Zweckverbände die Aufgabe der Klärschlammverwertung und des Phosphorrecyclings.

Der ZV rbb plant am Standort der Restmüllverwertungsanlage die Errichtung und den Betrieb einer einstraßigen Wirbelschichtfeuerung für den ZV kbb. In dieser Anlage sollen die mechanisch entwässerten kommunalen Klärschlämme der Verbandsmitglieder mit einer spezifischen Durchsatzleistung von 4,5 t TR/h und einer Feuerungswärmeleistung von 11,2 MW thermisch verwertet werden.

Das Vorhaben soll im gestuften Verfahren, bestehend aus zwei Teilgenehmigungen (Bau und Betrieb der Anlage), zugelassen werden.

Mit Antrag vom 22.11.2023, letztmalig ergänzt am 10.04.2024, hat der ZV rbb die erste immissionsschutzrechtliche Teilgenehmigung für die Errichtung der Gebäude und Anlagen beantragt.

Der Baubeginn ist im Herbst 2025 vorgesehen, die Inbetriebnahme zum Jahresende 2027. Der Fortschritt der Arbeiten kann auf der Homepage unter <https://www.zvkbb.de/das-projekt> verfolgt werden.

## **5.6 KZV Südbaden / AZV Breisgauer Bucht (KA Forchheim)**

Der im April 2022 gegründete "Klärschlammverwertung Zweckverband Südbaden" (KZV Südbaden) hat auf seiner Verbandsversammlung am 03.05.2024 einstimmig den Beschluss zum Bau einer einstraßigen Wirbelschichtverbrennung am Standort der Kläranlage Forchheim (AZV Breisgauer Bucht, Landkreis Emmendingen) gefasst. In der Anlage sollen die ca. 88.000 t/a entwässertes Klärschlamm (ca. 22.000 t/a TM) der Verbandsmitglieder getrocknet und verbrannt werden.

Aufgrund der drängenden Zeit werden auch hier die Arbeiten zum Genehmigungsantrag und zur Ausführungsplanung parallel vorangetrieben.

Der KZV steht seit März 2023 in enger Abstimmung mit den zuständigen Behörden im Regierungspräsidium. Der Scoping-Termin zur Absprache der erforderlichen Gutachten hat am 07.12.2023 stattgefunden. Der Genehmigungsantrag ist im August 2024 eingereicht worden.

Der Baubeginn ist für das dritte Quartal 2025 angestrebt, so dass die Monoverbrennungsanlage im besten Fall im Dezember 2028 in Betrieb gehen kann.

Der KZV legt ebenso wie der ZV rbb grossen Wert auf die Beteiligung der Öffentlichkeit und berichtet über alle Aktivitäten zeitnah unter <https://kzv-suedbaden.de> und im Rahmen von Informationsveranstaltungen auf der Kläranlage.

## **5.7 KomPhoS GmbH / TTS GmbH (KA Bonndorf)**

Die TTS GmbH plant im Einvernehmen mit der Stadt Bonndorf (Landkreis Waldshut) auf dem Gelände der KA Bonndorf den Bau einer Wirbelschichtverbrennung mit 2 Linien und einer Gesamtkapazität von 20.000 t/a TM (ca. 80.000 t/a OS).

Für den Bau der Anlage mit frühzeitiger Beteiligung der Öffentlichkeit hat die Stadt Bonndorf Mitte 2022 begonnen, den Flächennutzungsplan zu ändern und einen Bebauungsplan aufzustellen.

Das Anlagenkonzept sieht die (Voll-)Trocknung und Verbrennung von insgesamt 20.000 t/a TM vor, wobei der Bau von 2 baugleichen Verbrennungslinien zu je 10.000 t/a TM stufenweise, in Abhängigkeit der Auslastung erfolgen soll.

Die erste Verbrennungslinie soll primär den entwässerten Klärschlamm im Umkreis der Kläranlage Bonndorf verwerten. Um eine hohe Auslastung der Anlage sicherzustellen, sollen zusätzlich getrocknete Klärschlämme von den umliegenden, regional betriebenen Trocknungsanlagen im LK Tuttlingen und LK Lörrach akquiriert werden.

Für die erste Verbrennungslinie (10.000 t/a TM) soll die Volltrocknung der entwässerten Schlämme mithilfe eines Niedertemperatur-Bandrockners brüdenfrei erfolgen. Reicht die Wärme aus der Klärschlammverbrennung nicht zur Trocknung der Schlämme aus, soll zusätzliche Wärme über ein angegliedertes Holzvergassungs-BHKW geliefert werden. Der dort erzeugte Strom wird zum Teil für den Trockner verwendet, der verbleibende Rest soll den Fremdbezug an Strom der benachbarten Kläranlage senken.

Bei Verwertung weiterer getrockneter Klärschlämme muss keine Energie zur Trocknung der Schlämme aufgebracht werden, so dass der Energieüberschuss aus der Verbrennung zur Erhöhung der Stromerzeugung über eine OCR-Anlage mit Betrieb einer Dampfturbine genutzt werden soll.

Die erzeugten Aschen sollen vor Ort in drei Qualitäten (hoch/mittel/niedrig belastet) vorsortiert, mit verschiedenen Säuren aufgeschlossen, granuliert und als P-Basisdünger an Düngemittelhersteller abgegeben werden, die durch Zumischung weiterer Nährstoffe verschiedene Dünger konfektionieren und vertreiben. Die Bemusterung der Asche und die Gespräche mit den Abnehmern (Raiffeisen, BayWa) sind laut Angaben von TTS abgeschlossen.

Die Anlagenplanung ist laut Mitteilung von TTS abgeschlossen.

## **5.8 KSV Walheim / EnBW (Kohlekraftwerk Walheim)**

Auch die Planungen der EnBW zum Bau der Klärschlammverbrennungsanlage (KSV) am Standort des Kohlekraftwerks in Walheim befinden sich aktuell im gestuften immissionschutzrechtlichen Genehmigungsverfahren. Der Konzern plant mit einer Inbetriebnahme zur Jahresmitte 2027.

Im Februar 2023 hat die EnBW den Vorbescheid und die erste Teilgenehmigung zum Bau der Anlage mit vorzeitigem Beginn der Arbeiten beantragt.

Im November 2023 wurden zur Ergänzung der Bauplanung außerhalb des eigentlichen Baufelds Probepfähle gesetzt, um die Erfordernisse der Baugründung weiter abzuklären.

Im Rahmen des immissionsschutzrechtlichen Genehmigungsverfahrens wurde im Januar 2024 von der höheren Immissionsschutzbehörde ein Antrag auf ein Zielabweichungsverfahren zum Raumordnungsplan gestellt. Dieser Antrag wurde mit Bescheid des Regierungspräsidiums vom 23.05.2024 positiv beschieden.

## 6 Aktueller Stand zur Umsetzung der P-Rückgewinnungspflicht in Baden-Württemberg

### 6.1 Einführung

Wenn 2029 durch Inkrafttreten Artikels 5 in der AbfKlärV die Pflicht zur P-Rückgewinnung aus Klärschlamm rechtskräftig wird, stellt die Klärschlammverbrennung nicht mehr die Endstufe der Klärschlammbehandlung vor einer endgültigen Deponierung dar, sondern eine Vorbehandlungsstufe vor dem nächsten Behandlungsschritt, der P-Rückgewinnung aus Klärschlammasche oder deren stofflichen Nutzung. Die Klärschlammverbrennung erlangt somit eine zentrale Bedeutung für die Sicherung der Klärschlammensorgung bundesweit.

In Baden-Württemberg erfolgt die thermische Klärschlammverwertung nach dem Strukturkonzept für Baden-Württemberg (2020) derzeit zu 39% über Monoverbrennung und zu 61% über Mitverbrennung innerhalb und außerhalb des Landes (**Abbildung 16**).

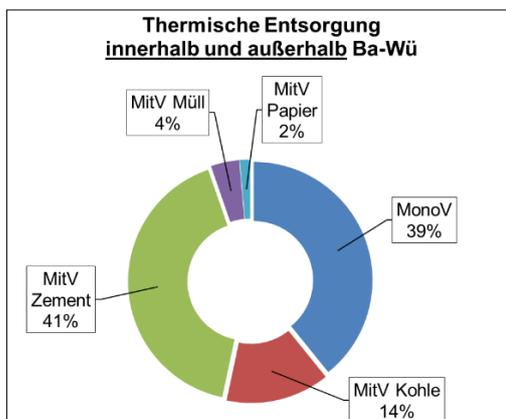


Abbildung 16: Thermische Klärschlammverwertung von baden-württembergischen Klärschlämmen 2020

Das Land Baden-Württemberg steht somit aktuell vor der großen Aufgabe, die Klärschlammensorgung von der Mitverbrennung, die vorwiegend in Zement- und Kohlekraftwerken stattfindet, auf die Klärschlammmonoverbrennung umzurüsten. Insofern fokussieren die Aktivitäten der Kläranlagenbetreiber darauf, bis 2029 Wege in die Monoverbrennung ihrer Klärschlämme sicherzustellen.

Hierfür sind in Baden-Württemberg, wie bereits erläutert, verschiedene Planungs- und Bauvorhaben fertiggestellt oder befinden sich aktuell in der Planung bzw. im Genehmigungsverfahren (**Abbildung 17**).

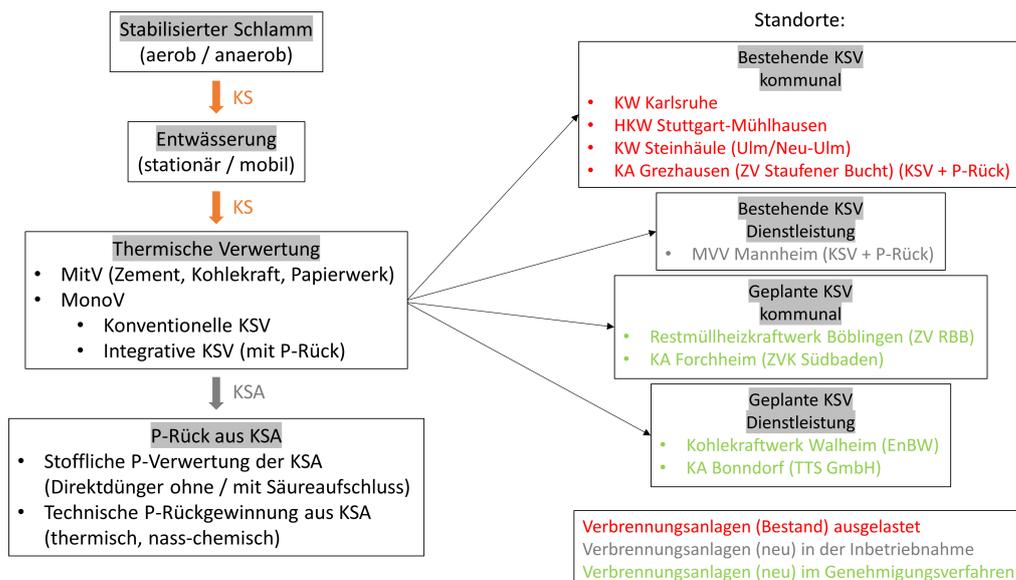


Abbildung 17: Übersicht zu Bestand und Planungen von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Baden-Württemberg

Neben der Beteiligung an kommunalen Klärschlammverbrennungsanlagen (Vorteil: Eigenregie!), streben viele Kläranlagenbetreiber weiterhin die thermische Klärschlammverwertung in Form einer Dienstleistung an. Insofern dominiert bei diesen Kläranlagenbetreibern eine abwartende Haltung mit Erwartung regionaler Planungen und Aktivitäten privater Betreiber/Anbieter.

Um die Frage nach Sicherstellung der P-Rückgewinnung kümmern sich tatsächlich und konkret fast ausschließlich die Kläranlagenbetreiber und Dienstleistungsunternehmen, die auch eine Klärschlammverbrennungsanlage betreiben oder planen. Sie übernehmen mit der Verbrennung die Pflicht zur anschließenden P-Rückgewinnung aus der Klärschlammmasche, so dass die meisten Kläranlagenbetreiber ihre Aktivitäten zur Umsetzung der P-Rückgewinnungspflicht in der Sicherstellung der Klärschlammverbrennung sehen.

## 6.2 Strategien der Betreiber zur P-Rückgewinnung

Die P-Rückgewinnung kann durch eine technische Aufbereitung der Klärschlammmasche (nasschemische Verfahren, thermochemische Verfahren) zu einem P-Rezyklat erfolgen oder durch eine direkte, stoffliche Verwertung der P-haltigen Klärschlammmasche zu einem Direktdünger. Die Verfahren unterscheiden sich in ihrem technischen Aufwand und folglich in den damit verbundenen Behandlungskosten.

Beide Verfahrensweisen sind in Baden-Württemberg vorzugsweise als zusätzliche Dienstleistung nach der thermischen Verwertung ins Auge gefasst.

Die Betreiber der Verbrennungsanlagen in Karlsruhe, Stuttgart, Neu-Ulm und Walheim unternehmen Anstrengungen, um den Bau der großtechnischen Versuchsanlage in Schkopau nach dem Ash2Phos-Verfahren zu unterstützen. Hierbei handelt es sich um eine nasschemische Aufbereitung der Klärschlammmasche zu einem Rezyklat, das unmittelbar in die Produktionslinien der Düngemittelindustrie eingeschleust werden kann.

Die KomPhos GmbH verfolgt die stoffliche Verwertung der erzeugten Asche in Form eines Direktdüngemittels, indem sie die Asche vor Ort zu einem Granulat in drei verschiedenen Qualitäten aufbereiten und an regionale Düngemittelvertreiber zur weiteren Konfektionierung abgeben will.

Bisher ist nur eine privatwirtschaftliche P-Rückgewinnungsanlage in Hamburg nach dem Tetraphos-Verfahren in Betrieb. Deutliche Impulse werden bei Abschluss des laufenden RePhoR-Vorhabens erwartet, wenn die in diesem Rahmen erstellten Pilotanlagen belastbare Angaben zu Leistungsfähigkeit und Kosten der erprobten Verfahren liefern und möglicherweise auch Planungen zu weiteren großtechnischen Anlagen aus diesem Projekt resultieren. Die Projekte der RePhoR-Maßnahme haben laut zugehöriger Homepage Laufzeiten bis maximal Mitte 2026. Dies kann sich durch Verzögerungen jedoch auch noch nach hinten verschieben.

### 6.3 Verbrennungskapazitäten Baden-Württemberg / Bedarfsregionen

Beurteilt man die Verbrennungskapazität für Baden-Württemberg unter der Annahme, dass die geplanten Verbrennungsanlagen im Genehmigungsprozess tatsächlich realisiert werden und die Bestandsanlagen ihre Verbrennungsleistung aufrechterhalten, ergibt sich die folgende überschlägige Bedarfsrechnung:

*Tabelle 10: Verbrennungskapazität für Baden-Württemberg (aktualisierte Prognose 2024, gerundete Werte)*

	Verbrennungskapazität	
	OS [t/a]	TM [t/a]
Bestand / Altanlagen		
Karlsruhe/ Stuttgart/ Neu-Ulm/ Balingen/ Renningen	252.000	63.000
Bestand / Inbetriebnahme Neuanlagen		
Breisach-Grezhausen (Staufener Bucht)	10.500	2.600
Mannheim (Annahmeanteil BW 50%)	67.500	16.900
Planungen / Genehmigungsverfahren		
Böblingen	120.000	30.000
Forchheim (Breisgauer Bucht)	88.000	22.000
Bonndorf (KomPhos) (1 Verbrennungslinie)	40.000	10.000
Walheim (MSE/EnBW)	180.000	45.000
Summe	758.000	189.500
Ungedeckter Bedarf		221.000 – 189.500
		31.500

Demnach besteht in Baden-Württemberg selbst bei Realisierung aller Bauvorhaben eine Deckungslücke von ca. 30.000 t TM/a. Dies entspricht ca. 14 % des baden-württembergischen Klärschlammaufkommens.

Einen bedeutsamen Beitrag zur Sicherung der thermischen Klärschlammverwertung in Baden-Württemberg kann die geplante Monoverbrennungsanlage der EnBW in Walheim leisten. Hier entstünde genügend Verbrennungskapazität zur Deckung des Bedarfs in den nördlichen und östlichen Regionen des Landes. Mit Inbetriebnahme der Großanlage in Walheim könnte es zu Verschiebungen der Klärschlammströme in Baden-Württemberg kommen, die Verbrennungskapazitäten in bestehenden Anlagen freisetzen und somit zu einer Neuverteilung der Klärschlammströme führen könnte. Wie weit dadurch auch der Bedarf der mittleren und südlich gelegenen Landkreise Tübingen, Reutlingen und Zollernalbkreis bedient werden kann, bleibt abzuwarten (vgl. **Abbildung 18** rote gestrichelte Linie). Für die Bodenseeregion (vgl. **Abbildung 18** rote durchgezogene Linie) zeichnet sich noch keine Lösung für eine sichere Klärschlamm Entsorgung ab.

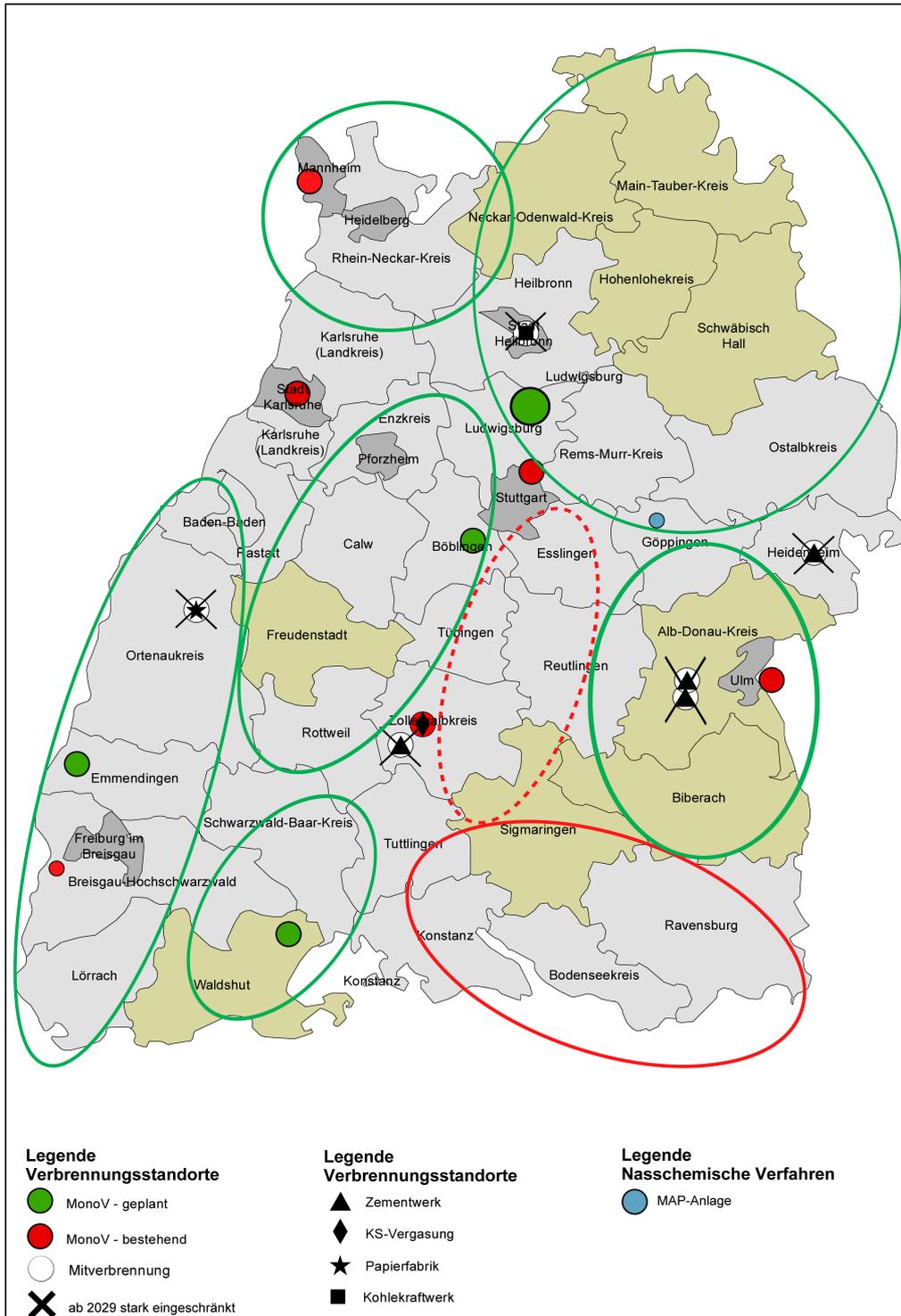


Abbildung 18: Räumliche Bedarfsabdeckung zur Klärschlammverbrennung in Baden-Württemberg. Grün hinterlegte Landkreise sind ländlich geprägt.

Im Zollernalbkreis (ZAK) ist die thermische Klärschlammbehandlung derzeit gut strukturiert und erfolgt im Wesentlichen auf drei Wegen:

- Klärschlamm-trocknung mit anschließender Klärschlammverbrennung in der KopfSynGas-Anlage auf dem Klärwerk Balingen (MonoV)
- Klärschlamm-trocknung auf der Kläranlage Ebingen (Albstadt) durch die Klärschlammverwertung Albstadt GmbH und anschließende Mitverbrennung im Zementwerk Dotternhausen (MitV)
- Klärschlammtransport zur Trocknungsanlage „Birkhof Energie“ in Sulz am Neckar (LK Rottweil) und anschließende Mitverbrennung im Zementwerk Dotternhausen (MitV).

Die Verbrennung in der KopfSynGas-Anlage kann auch über 2029 fortgesetzt werden. Allerdings steht hier eine Entscheidung darüber aus, ob die Anlage saniert und ertüchtigt oder in größerem Maßstab neu errichtet wird.

Für die Klärschlamm-trocknung der Albstadt GmbH steht ebenfalls eine Entscheidung zum weiteren Betrieb an, da eine anschließende Verbrennung des getrockneten Klärschlammes im Zementwerk nach 2029 nicht mehr möglich sein wird. Dasselbe gilt für die Klärschlamm-trocknung bei der "Birkhof Energie".

Welche Wege in die Monoverbrennung der Klärschlämme im Zollernalbkreis geplant sind, hängt somit maßgeblich von den Entscheidungen dieser drei Betreiber ab, die sich bereits in den vergangenen Jahren um die thermische Behandlung und Verwertung der Klärschlämme im Landkreis gekümmert haben und auf die sich die beteiligten Kläranlagen auch weiterhin verlassen.

Die Kläranlagen an der westlichen Landesgrenze und in der Landesmitte erhalten zusätzliche Verbrennungskapazitäten in den geplanten Verbrennungsanlagen des KZV Südbaden und des ZV rbb in Böblingen.

Der Rhein-Neckar-Kreis und Neckar-Odenwaldkreis hätten die Möglichkeit zur thermischen Verwertung der Klärschlämme vorzugsweise in der nahe gelegenen Monoverbrennungsanlage der MVV Mannheim.

Eine letzte verbliebene Bedarfsregion liegt im Südosten des Landes, im Raum Bodensee/Oberschwaben. Erste Überlegungen zum Bau einer Verbrennungsanlage in dieser Region wurden in jüngster Vergangenheit von einer Interessengemeinschaft aus vier kommunalen Kläranlagenbetreibern angestellt. Die Aktivitäten hierzu ruhen jedoch zurzeit und werden möglicherweise 2027 abhängig von der Marktentwicklung wiederaufgenommen.

## 7 Empfehlungen

### 7.1 Datenerhebung im Rahmen der Berichtspflicht 2027

#### 7.1.1 Erweiterung des Online-Portals "DWA Betrieb"

Kläranlagenbetreiber müssen jährlich für den Kläranlagenleistungsnachweis über den DWA-Landesverband BW an das Umweltministerium berichten. Die Klärschlammengen müssen dagegen jährlich an die LUBW gemeldet werden. In 2023 waren zusätzlich für die Betreiber die LAGA-Berichte zur P-Rückgewinnung auszufüllen.

Um die Kläranlagenbetreiber von Mehrfachabfragen zu entlasten, ist ein Zusammenführen verschiedener Datenerhebungen anzustreben. Synergien können hier auch bei der fachlichen Vorprüfung der Daten auf Behördenseite genutzt werden.

In Baden-Württemberg könnte das bestehende Online-Portal DWA Betrieb zur Erhebung der Daten für den DWA-Leistungsnachweis entsprechend erweitert werden. In diesem Tool kann auch eine (teil-)automatisierte Plausibilisierung der Daten erfolgen. Hierbei können die Klärschlammengen, die Analysen bzgl. Klärschlammqualität und die Entsorgungswege erhoben werden, so dass alle Daten für die Erstellung der Abfallbilanz vorliegen. Eine Schnittstelle von DWA Betrieb zu WIBAS-AGS besteht bereits und könnte erweitert werden.

Die Nutzung bestehender Online-Erfassungssysteme, die bereits für die Berichterstattung der Kläranlagenbetreiber in Betrieb sind, wurde bereits 2023 in einzelnen Bundesländern umgesetzt.

#### 7.1.2 Verbesserung der Ausfüllhilfe zur Berichtspflicht nach § 3a AbfKlärV

Falls der Vorschlag aus Kapitel 7.1.1 bis zum anstehenden Bericht 2027 nicht umgesetzt werden sollte, wird eine grundlegend überarbeitete Ausfüllhilfe empfohlen, um mit unmissverständlichen Abfragen zu fehlerfreien Angaben zu kommen.

Folgende Änderungen sollten konkret vorgenommen werden:

- Evtl. vorgegebene Antworten zum Ankreuzen anstatt zum Löschen anbieten
- Separater Frageblock zur Schlammentwässerung:
  - Wird auf der KA entwässert? ja/nein
  - Mobil oder stationär? ankreuzen
  - Wird Nassschlamm zur Entwässerung an eine andere KA abgegeben?  
ja/nein
  - Nassschlammlieferung zu welcher KA? Name.....
- Angabe zur Mitgliedschaft in einem Zweckverband oder einer Entsorgungsgemeinschaft?  
Ja/Nein  
Welcher? Name.....
- Angabe des P-Gehaltes im Klärschlamm in (g P/kg TM) anstatt (mg P/kg TM)
- Klarstellung: entwässertes KS – TR-Gehalt > 15 % TR  
Getrockneter KS – TR-Gehalt > 40 % TR
- Klarstellung: Eigenschlamm = ohne Fremdschlamm  
Abgabeschlamm (zur Entsorgung) = Eigenschlamm + Fremdschlamm
- Geplante/(eingeleitete) Maßnahme P-RÜCK - Abfrage nur geplante Maßnahmen zur P-Rückgewinnung

## **7.2 Schulungsbedarf**

### **7.2.1 Schulung des KA-Betriebspersonals über Nachbarschaftstreffen**

Für den DWA-Landesverband Baden-Württemberg ergibt sich eine direkte Möglichkeit zur weiteren Vertiefung des Themas im Rahmen von Web-Seminaren und der DWA-Nachbarschaftsarbeit. Hierfür wird von der DWA Schulungsmaterial in Form einer PP-Präsentation erarbeitet werden, die den Lehrern von der DWA für die Nachbarschaftsarbeit zur Verfügung gestellt wird.

Hierbei sollte die Datenerhebung im Rahmen der Nachbarschaftstage erklärt werden, um mögliche Missverständnisse aufzuzeigen und eine Anleitung zum richtigen Ausfüllen zu geben. Folgende prominente Fehler sollten im Bericht 2027 vermieden werden:

- Angabe  $P_2O_5$  anstatt P (elementar)
- Angabe (Eigenschlamm + Fremdschlamm) als Eigenschlamm
- Angabe Trockenmasse (TM) anstatt Menge entwässerter Klärschlamm (OS)

### **7.2.2 Schulung des Personals der zuständigen Behörden**

Die Auswertung hat auch gezeigt, dass die zuständigen Überwachungsbehörden weiterhin für das Thema sensibilisiert und ebenfalls geschult werden sollten.

Die zielführende Bearbeitung des Themas innerhalb der LRÄ sollte intern zwischen den Zuständigkeitsbereichen Wasser und Abfall abgestimmt, veröffentlicht (Homepage, Telefonzentrale innerhalb des Amtes) und die Zuständigen dem RP mit Kontaktdaten gemeldet werden, um die Kommunikationswege effizient nutzen zu können. Analog wird eine interne Abstimmung innerhalb der RPen zwischen den beiden Zuständigkeitsbereichen Abwasser und Abfall angeregt.

Die Behörde soll sich einen Überblick über alle berichtspflichtigen Kläranlagen in ihrem Zuständigkeitsbereich verschaffen und die Ansprechpartner auf den Kläranlagen erfassen. Die Übersicht der Kläranlagen sollte auch Angaben zur Behandlung des nicht entwässerten Schlammes und zu bestehenden Kooperationen in diesem Bereich enthalten. Die Herausforderung dabei ist, dass den Abfallbehörden die Kontakte bzw. Informationen zu den Kläranlagen nicht vorliegen, da zugehörige Anlagen im Zuständigkeitsbereich (Ab-)Wasser liegen. Aus diesem Grund ist eine enge Zusammenarbeit und Abstimmung zwischen Wasser- und Abfallbehörden notwendig.

Die DWA könnte nach behördenintern abgestimmter Benennung der Ansprechpartner auch hier unterstützend zur Seite stehen und einmalige Schulungen mit entsprechendem Schulungsmaterial z. B. in den vier Regierungspräsidien abhalten. Im Rahmen solcher Schulungen können die Aufgaben zur Prüfung der Berichte durch die Landratsämter erläutert und Fragen direkt geklärt werden.

Wichtig wäre auch der Hinweis auf die Abgabe des Berichtes im Excel-Format und nicht im PDF-Format, sofern keine Online-Lösung umgesetzt wird.

## **7.3 Klärung offener Fragen, z. B. durch eine LAGA-Arbeitsgruppe / Umweltministerkonferenz**

Unsicherheiten bei der Umsetzung der P-Rückgewinnung ergeben sich auch durch folgende offene Fragen, die auf Bundesebene geklärt werden müssen.

### **7.3.1 Wann gilt der Grenzwert von 20 g P/kg TM als eingehalten (Analysehäufigkeit/Toleranzbereich)?**

Die Angaben des Berichtes 2023 zum P-Gehalt im Klärschlamm beruhen im Einklang mit den Bestimmungen der AbfKlärV zum großen Teil auf einzelnen Klärschlammanalysen, d. h. auf Stichproben.

Untersuchungen hierzu haben jedoch gezeigt, dass der P-Gehalt im Jahresverlauf schwanken kann. Aus diesem Grunde erscheint eine Entscheidung zur P-Rückgewinnungspflicht auf der Grundlage von nur einer jährlichen Messung unsicher.

Anhand der vorliegenden Daten sollte eine Empfehlung zur Analysehäufigkeit und zum Toleranzbereich für Klärschlämme ausgearbeitet werden, deren P-Gehalt im Bereich um 20 g P/kg TM liegt. Es wäre beispielsweise möglich, die Durchführung von jährlich 5 Klärschlammuntersuchungen zum P-Gehalt zu fordern (Untersuchung von 3 Parametern: P, CaO, TM), die der zuständigen Behörde zu übermitteln sind. Die Einhaltung des Grenzwertes von 20 g P/kg TM könnte bei 4-maliger Unterschreitung und 1-maliger Überschreitung anerkannt werden (Erfüllungsquote 80 %).

### **7.3.2 Verhältnismäßigkeit der Forderung nach P-Rückgewinnung für Betreiber von Kläranlagen der GK 1 bis 3**

Die Auswertung des Berichtes 2023 (vgl. Kapitel 4.4) hat gezeigt, dass die Vielzahl der Kläranlagen in Größenklasse GK 1 bis 3 nur einen äußerst geringen Beitrag zum Phosphorrückgewinnungspotenzial des Landes leisten. Gemäß AbfKlärV steht den Kläranlagen dieser Größenklassen die bodenbezogene Verwertung offen. In Baden-Württemberg wird jedoch bereits ein Großteil dieser Klärschlämme thermisch verwertet und eine Rückkehr in die bodenbezogene Verwertung ist nicht gewünscht.

Das Projektkonsortium, das diesen Bericht erstellt hat, empfiehlt, dass der Gesetzgeber prüfen sollte, ob und wie für die Kläranlagen der Größenklasse 1 bis 3 ein Sonderstatus aufgrund der Geringfügigkeit des Phosphor-Potenzials eingeräumt werden könnte. Bedenken sollte man hierbei neben dem zusätzlichen Aufwand von häufigeren Klärschlamm-Untersuchungen auch die Herausforderungen in der Annahme von Schlamm aus beispielsweise Teichanlagen in den Monoverbrennungsanlagen.

Aktuell ist noch nicht ersichtlich, ob bis 2029 ausreichende Verbrennungskapazitäten für alle Klärschlämme im Land zur Verfügung stehen. Sollte das nicht der Fall sein, ist rechtzeitig abzuklären, wie insbesondere bei den Kläranlagen der GK 1 bis 3 weiter vorzugehen ist. Ausgehend von der unwiderruflichen Schließung der Kohlekraftwerke in absehbarer Zukunft könnte durch Ausnahmeregelung für die Klärschlämme aus Kläranlagen der GK 1 bis 3, deren P-Gehalt über dem Grenzwert liegt, möglicherweise die Mitverbrennung in einem Zementwerk aufrecht erhalten bleiben. Diese sollte zeitlich begrenzt werden bis ausreichend Monoverbrennungskapazität in Baden-Württemberg zur Verfügung steht, um diesen Entsorgungsweg zur Sicherung der Klärschlamm Entsorgung zu erhalten. Die Machbarkeit und Bereitschaft für eine derartige Unterstützung wäre mit den Betreibern von Zementwerken in einem Branchendialog zu diskutieren.

### **7.3.3 Einhaltung der Grenzwerte der AbfKlärV (KS vs. KSA)**

Die AbfKlärV regelt zum aktuellen Zeitpunkt nur die bodenbezogene Verwertung von entwässertem Klärschlamm und fordert die Einhaltung der Grenzwerte nach AbfKlärV für den entwässerten Klärschlamm.

Ab 2029 wird die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm voraussichtlich vorwiegend nach thermischer Behandlung der Klärschlämme aus der Klärschlammmasche erfolgen. In diesem Fall ist Klärschlammmasche das Ausgangsprodukt entweder für die stoffliche Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts (Landbau, bodenbezogene Verwertung) oder die technische Aufbereitung zu Düngemitteln. Daher ist eine Änderung der DüMV erforderlich, die die Einhaltung der Grenzwerte der AbfKlärV bei thermischer Verwertung für die Klärschlammmasche fordert, nicht mehr ausschließlich für den entwässerten Klärschlamm.

Dieser Punkt befindet sich bereits in der fortgeschrittenen Diskussion und eine Gesetzesänderung diesbezüglich steht bereits in Aussicht.

### **7.3.4 Sicherstellung der Auslastung von P-Rückgewinnungsanlagen (Finanzierung)**

In Baden-Württemberg ist die Thematik „Gebührenfähigkeit“ bereits seit 2019 verbindlich geklärt. Neben der Herbeiführung tragfähiger Regelungen in den anderen Ländern zur Gebührenfähigkeit der P-Rückgewinnung besteht zum gegenwärtigen Zeitpunkt ein vordringliches Problem darin, dass in allen Ländern Bauentscheidungen für die dringend benötigten Anlagen zur P-Rückgewinnung getroffen werden müssen. Für Investoren ist die vertragliche Zusicherung von Klärschlammasche zur Auslastung der Rückgewinnungsanlagen schon vor 2029 erforderlich, so dass ein wirtschaftlicher Betrieb sichergestellt werden kann.

### **7.3.5 Laufzeiten von Entsorgungsverträgen**

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt laufen erste Ausschreibungen zur Sicherung der thermischen Klärschlamm Entsorgung mit P-Rückgewinnung ab 2029 an. Dies erfordert Vertragslaufzeiten von 10-15 Jahren, die in der Abwasserwirtschaft nicht üblich und daher schwer durchsetzbar sind.

Hier wäre eine offizielle Richtigstellung hilfreich, dass es keine gesetzlichen Bestimmungen gibt, die nur kürzere Vertragslaufzeiten erlauben. Dieses Thema sollte juristisch beleuchtet, im Städte- und Gemeindetag diskutiert und im Anschluss daran von diesen Gremien publik gemacht werden.

## 8 Zusammenfassung und Fazit

Mit der Berichtspflicht 2023 über die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Sicherstellung der ab 1. Januar 2029 durchzuführenden Phosphorrückgewinnung gingen neue Aufgaben und Pflichten einher, die von allen Betroffenen erstmals ausgeführt wurden. Daher verwundert es nicht, dass bei der Abwicklung zahlreiche Fehler und Verzögerungen auftraten. Insbesondere ist durch die aufgetretenen Fehler deutlich geworden, dass weiterhin Informationsbedarf auf allen beteiligten Ebenen besteht.

- Auf der Ebene der kommunalen Kläranlagenbetreiber, die ihrer Pflicht zur Berichterstattung nicht immer nachkamen. Insbesondere dann, wenn die Betreuung der Kläranlage über ein beratendes Ingenieurbüro erfolgte oder eine Mitgliedschaft in einem Zweckverband bestand. Seitens einiger Kläranlagenbetreiber wurde fälschlicherweise die Annahme getroffen, dass die Pflicht zur Berichterstattung bzw. deren formale Durchführung automatisch durch das beratende Ingenieurbüro bzw. durch den Zweckverband erfolgte.
- Auf der organisatorischen Ebene der Überwachungsbehörden, bei denen der Arbeitsauftrag nicht immer geklärt bzw. klar war, keine Handlungsanweisungen ausgegeben waren oder Informationsschreiben des Umweltministeriums zum Teil fehlgeleitet wurden bzw. verloren gingen.
- Auf der fachlichen Ebene bei den Sachbearbeiterinnen und Sachbearbeitern der Überwachungsbehörden, die aufgrund der betroffenen Schnittstelle zwischen Wasser- und Abfallrecht oftmals kein ausreichendes Hintergrundwissen zur Thematik des zukünftigen Umgangs mit kommunalem Klärschlamm (insbesondere P-Rückgewinnung) hatten.

Die Auswertung der Berichte 2023 hat gezeigt, dass immer noch erheblicher Informationsbedarf bei allen Beteiligten besteht, weshalb die Einholung fehlender Berichte und Plausibilisierung der Rohdaten sehr aufwändig und zeitintensiv war. Bezüglich der geplanten Maßnahmen zur KS-Entsorgung und Phosphor-Rückgewinnung wurden folgenden Angaben gemacht:

- Jeweils ca. 50 % der erfassten KA-Betreiber in GK 4 und 5 entscheiden sich für die kommunale Monoverbrennung (ohne konkrete Lösung der P-Rückgewinnung) bzw. für die thermische Vorbehandlung mit P-Rückgewinnung als externe Dienstleistung.
- Eine Kläranlage in GK 5 strebt eine P-Abreicherung auf der Kläranlage an.

Die wissenschaftlichen Auswertungen führten zu folgenden Aussagen:

- Die Datengrundlage für die wissenschaftliche Auswertung war in Abhängigkeit der Fragestellung überwiegend sehr gut.
- Über 80 % der baden-württembergischen Klärschlammherzeuger sind formal zur Phosphorrückgewinnung verpflichtet, da der P-Gehalt in den Schlämmen  $\geq 20$  g/kg TM ist. Innerhalb der GK 1 und GK 2 unterschreiten jedoch relativ viele Anlagen (64 % bzw. 36 %) diesen Wert.
- Im „Grenzbereich“ von 19,0–21,0 g P/kg TM liegen statistisch insgesamt ca. 8 % der baden-württembergischen Kläranlagen; dies entspricht rechnerisch 69 Anlagen.
- Die Klärschlämme der Kläranlagen der GK 4 und 5 (Anzahl: 344) verfügen mit insgesamt ca. 93 % (ca. 6.060 t P/a) über den weit überwiegenden Anteil am Phosphorpotenzial. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Kläranlagen der GK 1 bis 3 (Anzahl: 515 bzw. Anteil an Kläranlagengesamtanzahl mit 60 %) nur ca. 7 % zum Phosphorpotenzial beitragen.
- Das Verfahren der getrennten anaeroben Schlammstabilisierung führt im Vergleich zur simultanen aeroben Schlammstabilisierung i. d. R. zu deutlich höheren Phosphorgehalten in den Klärschlämmen.

- Bei der simultanen aeroben Schlammstabilisierung führt der Einsatz von Aluminiumsalzen offenbar zu höheren P-Gehalten im Klärschlamm als der Einsatz von Eisensalzen oder die Anwendung der Bio-P; der Einsatz von Mischprodukten jedoch führt zu ähnlich hohen P-Gehalten wie der Einsatz von Aluminiumsalzen. Wenn bei der getrennten anaeroben Schlammstabilisierung Mischprodukte verwendet werden, ist der P-Gehalt im Schlamm um ca. 10 % höher als bei Verwendung von Eisen- oder Aluminiumsalzen. Unter dem Aspekt der P-Rückgewinnung und des P-Recyclings kann daher die Empfehlung abgeleitet werden, den Einsatz von eisenhaltigen Fällmittel möglichst zu reduzieren und in den Kläranlagen auf eine Phosphatfällung mittels aluminiumhaltiger Fällmittel oder Mischprodukte umzustellen.
- Die Phosphorkonzentration nimmt mit höheren Fremdwasseranteilen im Kläranlagen-Zulauf ab, insbesondere bei Anlagen mit getrennter anaerober Schlammstabilisierung. Dies bedeutet, dass insbesondere Klärschlammherzeuger, deren Klärschlämme bisher knapp unter dem P-Rück-Grenzwert von 20 g P/kg TM liegen, P-rückgewinnungspflichtig werden könnten, wenn im Einzugsbiet Kanalsanierungsarbeiten mit dem Effekt der Fremdwasserreduzierung durchgeführt werden.

Mit dem Ziel, diese Situation bis zum Bericht 2027 zu verbessern und von Beginn an belastbare Rohdaten zu erhalten, liefern die aufgetretenen Komplikationen sowie die statische Auswertung der Daten vielerlei Handlungshinweise zur Verbesserung der Datenerhebung.

Bezüglich der Umsetzung der P-Rückgewinnungspflicht liegt der Fokus in Baden-Württemberg derzeit auf dem Ausbau der zukünftig erforderlichen Klärschlammverbrennungsanlagen. Neben der Schaffung weiterer Kapazitäten in kommunalen Klärschlammverbrennungsanlagen, welche den Vorteil der Eigenregie mit sich bringen, bevorzugen viele KA-Betreiber weiterhin die thermische Klärschlammverwertung in Form einer Dienstleistung. Insofern dominiert bei den KA-Betreibern eine abwartende Haltung mit Blick auf privatwirtschaftliche regionale Planungen und Aktivitäten.

Fragen zur Sicherstellung der P-Rückgewinnung werden vorrangig die Betreiber von Klärschlammverbrennungsanlagen betreffen und weniger die Betreiber von Kläranlagen, weshalb der Bericht 2023 hierzu wenige und z. T. widersprüchliche Angaben seitens der Kläranlagenbetreiber enthielt.