

Statusbericht zur Klärschlamm- entsorgung 2020



Statusbericht zur Klärschlamm Entsorgung
aus der kommunalen Abwasserbehandlung
im Freistaat Sachsen
– 2020 –

Jörg Wagner, Romana Richter, Karsten Struck, Roman Dinslage

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Zielstellung.....	8
1.1	Einführung	8
1.2	Herangehensweise.....	8
1.3	Datengrundlagen	9
2	Rechtliche Rahmenbedingungen	11
2.1	Kreislaufwirtschaftsrecht	11
2.1.1	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	11
2.1.2	Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung.....	11
2.2	Düngerecht.....	18
2.2.1	Düngegesetz (DüngG)	18
2.2.2	Düngeverordnung (DüV)	18
2.2.3	Sächsische Düngerechtsverordnung (SächsDüReVO)	19
2.2.4	Stoffstrombilanzverordnung (StoffBilV)	19
2.2.5	Düngemittelverordnung (DüMV).....	19
2.3	Immissionsschutzrecht	20
2.3.1	Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV).....	20
2.3.2	Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV)	20
2.3.3	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)	21
3	Ist-Stand des Klärschlammmanfalls, der Klärschlammqualität und der Klärschlammmentsorgung	22
3.1	Struktur der Abwasserbeseitigung im Freistaat Sachsen	22
3.2	Klärschlammmanfall	24
3.3	Klärschlammqualität	27
3.3.1	Schadstoffgehalte landwirtschaftlich verwerteter Klärschlämme	27
3.3.2	Phosphorgehalt	27
3.4	Bisherige Entsorgungswege für Klärschlämme im Freistaat Sachsen	28
4	Prognose des Klärschlammmanfalls	32
4.1	Methodik der Prognose	32
4.1.1	Bevölkerungsentwicklung.....	32
4.1.2	Anschlussgrad an die öffentliche Abwasserentsorgung	33
4.1.3	Veränderungen des Anschlusses industrieller und gewerblicher Einleiter	33
4.1.4	Modernisierung von Kläranlagen mit der Zielstellung der Reduzierung der Klärschlammengen	33
4.2	Prognose des Klärschlammmanfalls bis 2032	34
5	Phosphorrückgewinnung	35
5.1	Allgemeines	35
5.2	Verfahren der Phosphorrückgewinnung.....	35
5.3	Bewertung der Sekundärphosphate.....	40
5.3.1	Qualität der Sekundärphosphate	40
5.3.2	Ökonomische Betrachtungen zur Phosphorrückgewinnung	43
5.3.3	Ökobilanzielle Betrachtung der Phosphorrückgewinnung	46
5.3.4	Zusammenfassende Bewertung.....	46
5.4	Langzeitlagerung von Klärschlammverbrennungsrückständen	47
5.4.1	Betrachtung von Deponiestandorten für die Möglichkeit der Langzeitlagerung im Freistaat Sachsen	47
5.4.2	Technische und ökonomische Betrachtungen	48
5.4.3	Eignung der betrachteten Deponiestandorte	49
5.4.4	Zusammenfassende Bewertung.....	50
6	Aspekte der zukünftigen Klärschlammmentsorgung	51
6.1	Abfallwirtschaftsplanung.....	51
6.2	Thermische Entsorgung	51
6.2.1	Klärschlammmonoverbrennung	51

6.2.2	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken.....	53
6.2.3	Mitverbrennung in thermischen Abfallbehandlungsanlagen	53
6.2.4	Mitverbrennung in Zementwerken.....	53
6.2.5	Sonstige thermische Behandlungstechnologien	54
6.2.6	Zusammenfassende Bewertung der thermischen Klärschlamm Entsorgung	54
6.3	Bodenbezogene Verwertung.....	55
6.3.1	Verwertung in der Landwirtschaft.....	55
6.3.2	Verwertung im Landschaftsbau.....	56
6.3.3	Zusammenfassende Bewertung der bodenbezogenen Klärschlammverwertung	56
6.4	Stand und Bewertung der Vorhaben der Akteure zur Umsetzung der AbfKlärV in Sachsen	56
6.4.1	Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung	56
6.4.2	Private Entsorgungswirtschaft.....	60
6.4.3	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA).....	61
6.5	Einschätzung der zukünftigen Entsorgungssicherheit	61
7	Handlungsempfehlungen	62
7.1	Grundsätzliches.....	62
7.2	Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung	62
7.3	Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL)	63
7.4	Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger	63
8	Zusammenfassung.....	64
	Literaturverzeichnis.....	67
	Anhang	75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Organisationsformen der öffentlichen Abwasserbeseitigung im Freistaat Sachsen.....	23
Abbildung 2: Verteilung der Kläranlagen im Freistaat Sachsen auf die unterschiedlichen Größenklassen	23
Abbildung 3: Klärschlammanfall aus öffentlichen biologischen Abwasserbehandlungsanlagen im Freistaat Sachsen 2013 bis 2017.....	25
Abbildung 4: Klärschlammanfall 2017 in Sachsen nach Landkreisen und kreisfreien Städten in Tonnen TM/a	26
Abbildung 5: Klärschlammanfall in Sachsen 2017 nach Landkreisen und kreisfreien Städten anteilig in Prozent	26
Abbildung 6: Phosphorgehalte sächsischer Klärschlämme, geordnet nach Größenklassen	28
Abbildung 7: Entsorgungswege für Klärschlämme im Jahr 2017	29
Abbildung 8: Entwicklung der Klärschlammentsorgung 2013 bis 2017	29
Abbildung 9: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlammen und Klärschlammkomposten im Freistaat Sachsen im Zeitraum 2012 bis 2017	30
Abbildung 10: Bevölkerungsvorausberechnung im Freistaat Sachsen 1990 bis 2030.....	32
Abbildung 11: Prognose des Klärschlammanfalls für den Freistaat Sachsen für den Zeitraum 2018 bis 2032	34
Abbildung 12: Produktspezifische Kosten von Verfahren, unterteilt nach Ansatzpunkten	44
Abbildung 13: Einwohnerspezifische Kosten von Verfahren, unterteilt nach Ansatzpunkten.....	45
Abbildung 14: Standorte der bestehenden und geplanten Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Mitteldeutschland	52
Abbildung 15: Geografische Struktur der kommunalen Abwasserbeseitigung in Sachsen	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitskreise zur Klärschlammentsorgung im Freistaat Sachsen	9
Tabelle 2: Datengrundlagen und deren Quellen	10
Tabelle 3: Grenzwerte für Böden und Klärschlamm bei bodenbezogener Ausbringung gemäß § 7 Abs. 1 AbfKlärV und § 8 Abs. 1 AbfKlärV.....	13
Tabelle 4: Übersicht über die zukünftigen Entsorgungsmöglichkeiten für Klärschlämme	17
Tabelle 5: Verteilung der Abwasserbeseitigungspflichtigen mit Verantwortung für die Klärschlammentsorgung auf Organisationsformen.....	22
Tabelle 6: Kläranlagen der GK4b und 5 im Freistaat Sachsen.....	24
Tabelle 7: Schwermetall-/Schadstoffgehalte aller in Sachsen 2017 landwirtschaftlich verwerteten Klärschlammdünger aus sächsischen Kläranlagen.....	27
Tabelle 8: Aufbringungsmengen und -flächen für Klärschlammprodukte im Freistaat Sachsen in den Jahren 2013 bis 2018.....	30
Tabelle 9: Entsorgungswege ausgewählter Kläranlagen der GK5 und GK4b.....	31
Tabelle 10: Angepasste Bevölkerungsprognose für den Freistaat Sachsen von 2018 bis 2032 in Mio. Einwohner.....	33
Tabelle 11: Voraussetzungen sowie Vor- und Nachteile der Kristallisations- und Fällungsverfahren (eigene Zusammenstellung).....	36
Tabelle 12: Voraussetzungen sowie Vor- und Nachteile der Monoverbrennung	36
Tabelle 13: Einteilung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung	37
Tabelle 14: Überblick zu ausgewählten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung	38
Tabelle 15: Zuordnung von Phosphorprodukten zu Düngewirkungsstufen.....	41
Tabelle 16: Betrachtete Deponien zur Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungssaschen	48
Tabelle 17: Spezifische Lagerkosten für zwei Beispiele der Lagerklassen I und II	49
Tabelle 18: Ist-Stand sowie Planungen zur Klärschlammentsorgung der Aufgabenträger für Kläranlagen der GK5 und GK4b in Sachsen	57

Abkürzungsverzeichnis

Gesetze/Verordnungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
AbfKlärV (1992)	Klärschlammverordnung (Fassung von 1992)
BBodSchG	Bundesbodenschutzgesetz
BBodSchV	Bundesbodenschutzverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Bundes-Immissionsschutzverordnung
DepV	Deponieverordnung
DüngG	Düngegesetz
DüV	Düngeverordnung
DüMV	Düngemittelverordnung
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
IED	Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24.11.2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung)
SächsDüReVO	Sächsische Düngerechtsverordnung
SächsKomZG	Sächsisches Gesetz über kommunale Zusammenarbeit
SächsKrWBodSchG	Sächsisches Kreislaufwirtschafts- und Bodenschutzgesetz
SächsKrWBodSchZuVO	Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über Zuständigkeiten bei der Durchführung von Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Bodenschutzrechts
SächsLPIG	Gesetz zur Raumordnung und Landesplanung des Freistaates Sachsen (Landesplanungsgesetz)
StoffBilV	Stoffbilanzierungsverordnung
TA	Technische Anleitung
UStatG	Umweltstatistikgesetz

Behörden/Institutionen/Verbände/Gesellschaften

BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
DBU	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.
EU	Europäische Union
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LAV	Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH
LDS	Landesdirektion Sachsen
LEAG	Lausitzer Energie Kraftwerke AG
LfULG	Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie
RAVON	Regionaler Abfallverband Oberlausitz-Niederschlesien
SMEKUL	Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klima, Umwelt und Landwirtschaft
SMUL	Sächsisches Staatsministerium für Umwelt und Landwirtschaft
SMWA	Sächsisches Staatsministerium für Wirtschaft, Arbeit und Verkehr
StLA	Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen
TU Freiberg	Technische Universität Bergakademie Freiberg
UBA	Umweltbundesamt
WEV	Westsächsische Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH
ZAOE	Zweckverband Abfallwirtschaft Oberes Elbtal
ZWW	Zweckverband Wasserwerke Westerzgebirge

Einheiten

E	Einwohner
EUR/(E*a)	Euro pro Einwohner und Jahr
EUR/kg P	Euro pro Kilogramm Phosphor
EUR/t	Euro pro Tonne
EW	Einwohnerwert(e)
ha	Hektar
kg	Kilogramm
mg/kg TM	Milligramm pro Kilogramm Trockenmasse
µg/ml	Mikrogramm pro Milliliter
n	Anzahl
ng TE/kg	Nanogramm Toxizitätsäquivalent pro Kilogramm
t	Tonne(n)
t/ha	Tonnen pro Hektar

Sonstiges

a. F.	alte Fassung
AOX	Adsorbierbare organisch gebundene Halogene
B(a)P	Benzo(a)pyren
BVT	Beste verfügbare Technik
DK	Deponieklasse
di-PCB	dioxinähnliche polychlorierte Biphenyle
EBS	Ersatzbrennstoff
EFRE	Europäischer Fonds für Regionale Entwicklung
GK	Größenklasse
GKA	Gemeinschaftskläranlage
HTC	Hydrothermale Carbonisierung
IAA	Industrielle Absetzanlage
KA	Kläranlage
KW	Klärwerk
LK	Lagerklasse
MAP	Magnesiumammoniumphosphat
MBA	Mechanisch-biologische Abfallbehandlungsanlage
N	Stickstoff
NH4-N	Ammonium-Stickstoff
n. F.	neue Fassung
o. J.	ohne Jahresangabe
OS	Originalsubstanz
örE	öffentlich-rechtlicher Entsorgungsträger
P	Phosphor
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/F	Polychlorierte Dibenzodioxine und Dibenzofurane
RBP	Regionalisierte Bevölkerungsprognose
RBV	Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung
TE	Toxic Equivalent (Toxizitätsäquivalent)
TOC	Total Organic Carbon (gesamter organischer Kohlenstoff)
T.A.	Thermische Abfallbehandlungsanlage
TM	Trockenmasse
WHO	World Health Organization (Weltgesundheitsorganisation)
ZKA	Zentrale Kläranlage

1 Einführung und Zielstellung

1.1 Einführung

Die Klärschlammkonzeption 2015 wurde im Zuge der Fortschreibung des Abfallwirtschaftsplanes des Freistaates Sachsen (2016) erstellt. Zum Zeitpunkt der Erstellung war die Novellierung der rechtlichen Rahmenbedingungen der Klärschlammentsorgung sowie zum Einsatz von Düngemitteln noch nicht abgeschlossen. Vor dem Hintergrund dieser Unsicherheiten sowie im Hinblick auf mögliche Entwicklungen des Standes der Technik der Klärschlammbehandlung und Phosphorrückgewinnung wurden in der Klärschlammkonzeption 2015 Szenarienbetrachtungen zur Klärschlamm-entsorgung für die Jahre 2020 und 2025 durchgeführt.

Am 03.10.2017 trat die novellierte Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV) in Kraft. Im Vergleich zum Referentenentwurf des damaligen Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) vom August 2015, der eine wesentliche rechtliche Grundlage für die Klärschlammkonzeption 2015 war, sind in der novellierten AbfKlärV wesentliche Regelungen geändert. Darüber hinaus sind zuletzt im Jahr 2020 Änderungen im Bereich des Düngerechts erfolgt. Dies betreffen z.B. den Einsatz synthetischer Polymere gemäß Düngemittelverordnung (DüMV) sowie die Aufbringungsregeln für Klärschlamm nach Düngeverordnung (DüV).

Diese Umstände sorgen dafür, dass die Klärschlammkonzeption 2015 aktualisiert werden muss. Der vorliegende Statusbericht zur Entsorgung von Klärschlämmen aus der kommunalen Abwasserbehandlung im Freistaat Sachsen 2020 (Statusbericht zur Klärschlammentsorgung 2020) soll den Aufgabenträgern der Abwasserbeseitigung bzw. den Kläranlagenbetreibern und Klärschlammentsorgern als Informationsgrundlage zur zukünftigen Entsorgung ihrer Klärschlämme und zur Einführung der Phosphorrückgewinnung dienen. Darüber hinaus sind Handlungsempfehlungen an die jeweiligen Akteure enthalten.

Nicht Gegenstand des vorliegenden Berichtes sind das Aufkommen und die Entsorgung von Sieb- und Rechenrückständen, Sandfangrückständen sowie Abfällen aus der Kanalreinigung. Diesbezüglich wird auf die Klärschlammkonzeption 2015 verwiesen.

1.2 Herangehensweise

Für die Erarbeitung des Berichtes zur Klärschlammentsorgung waren die nachfolgend erläuterten Arbeitsschritte durchzuführen:

- In einem ersten Schritt wurden die aktuellen Rechtsgrundlagen ausgewertet und die geänderten Anforderungen an die Aufgabenträger herausgearbeitet.
- Für die Darstellung der Situation der Klärschlammentsorgung im Freistaat Sachsen im Jahr 2017 wurden die vorliegenden statistischen Daten ausgewertet. Darüber hinaus wurden Informationen aus Veröffentlichungen und Unterlagen des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) und des ehemaligen Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft (SMUL) zur Klärschlammentsorgung verwendet.
- Im Rahmen von Interviews wurden Betreiber größerer Kläranlagen (Größenklasse [GK] 5 und 4b¹) und Klärschlammentsorger im Freistaat Sachsen zum Stand ihrer Planungen im Hinblick auf die Umsetzung der zukünftigen Anforderungen an die Klärschlammentsorgung befragt.

¹ Die Größenklassen kommunaler Kläranlagen sind in Anhang 1 der Abwasserverordnung (AbwV) definiert. Ihnen sind Ausbaugrößen in Form von Einwohnerwerten (EW) zugeordnet. Die GK4 umfasst Ausbaugrößen von 10.001 bis 100.000 EW. Ab dem 01.01.2032 gelten bestimmte Regelungen der AbfKlärV für Kläranlagen ab einer Ausbaugröße von mehr als 50.000 EW (siehe Kapitel 2.1.2). Um diesen Regelungen auch bei der Einteilung der GK Rechnung zu tragen, wurde die GK4 im fachlichen Sprachgebrauch in die GK 4a (10.001 bis 50.000 EW) und die GK4b (50.001 bis 100.000 EW) unterteilt.

- Auf der Grundlage der Bevölkerungsentwicklung und weiterer Einflussfaktoren wurden die zukünftig anfallenden Klärschlammengen im Freistaat Sachsen prognostiziert.
- Der aktuelle Stand der derzeit in Entwicklung befindlichen Verfahren der Phosphorrückgewinnung wurde durch umfangreiche Literaturrecherchen und Experteninterviews herausgearbeitet. Die Verfahren wurden hinsichtlich ihres Entwicklungsstandes, der Qualität der gewonnenen Sekundärphosphate sowie ökonomischer und ökologischer Maßstäbe bewertet.
- Um die Möglichkeiten der Langzeitlagerung von Klärschlammaschen auf sächsischen Deponiestandorten einzuschätzen, wurden Betreiber von Deponien befragt. Die Deponiestandorte wurden im Vorfeld gemeinsam mit Experten der Landesdirektion Sachsen (LDS) mittels verschiedener Kriterien hinsichtlich ihrer prinzipiellen Eignung zur Langzeitlagerung ausgewählt.
- Anschließend wurden die zukünftig möglichen Entsorgungswege dargestellt und die derzeit bekannten vertraglich gesicherten Entsorgungswege und die Planungen der Aufgabenträger im Hinblick auf die Entsorgungssicherheit im Freistaat Sachsen bewertet.
- Im Ergebnis der Bewertung der vorliegenden Daten wurden Empfehlungen an die Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserentsorgung, das Sächsische Ministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft Freistaat Sachsen (SMEKUL) sowie die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger (öRE) formuliert.

1.3 Datengrundlagen

Zur Darstellung des Ist-Stands zum Klärschlammfall und der Klärschlamm Entsorgung wurde das Jahr 2017 gewählt. Als Grundlage dienten im Wesentlichen die Veröffentlichungen des Statistischen Landesamtes (StLA) sowie des LfULG und ehemaligen SMUL. Zur Ergänzung der vorliegenden Daten wurden die Betreiber von Kläranlagen der Größe GK5 und GK4b sowie Abwasserzweckverbände und bestehende Arbeitskreise hinsichtlich der zukünftigen Planungen befragt.

Im Freistaat Sachsen existieren zum ständigen Austausch und der konzeptionellen Planung der zukünftigen Entsorgung bisher zwei Arbeitskreise. Diese erarbeiten jeweils eine gemeinsame Lösung bzw. Konzeption zur zukünftigen Klärschlamm Entsorgung ab dem Jahr 2029 bzw. 2032. Tabelle 1 listet die Kooperationen und deren Mitglieder auf.

Tabelle 1: Arbeitskreise zur Klärschlamm Entsorgung im Freistaat Sachsen

Arbeitskreis	Mitglieder (Kläranlagen GK5 und 4b)
Interessengemeinschaft Klärschlamm Entsorgung Ostsachsen	Stadtwerke Görlitz AG (ZKA Görlitz-Nord [GK5]), Süd-Oberlausitzer Wasserversorgungs- und Abwasser Entsorgungsgesellschaft mbH (SOWAG) (ZKA Zittau [GK4b]), Eigenbetrieb Abwasserbeseitigung Bautzen (EAB) (KA Bautzen [GK4b]), Abwasserzweckverband "Obere Spree", Abwasserzweckverband Löbau-Nord), Stadtwerke Niesky GmbH, Zweckverband Abwasser Rothenburg /O.L., Gemeinde Steinigtwolmsdorf, Ver- und Entsorgungsgesellschaft Ostritz GmbH (VEGO)
Arbeitskreis Westsachsen (zukünftig: Klärschlammmanagement Westsachsen GmbH (KMW GmbH))	eins energie in sachsen GmbH & Co.KG (ZKA Chemnitz-Heinersdorf [GK5]), Regional-Wasser-/Abwasser-Zweckverband Zwickau/Werdau (ZKA Zwickau [GK5]), Zweckverband Kommunale Wasserversorgung/Abwasser Entsorgung Mittleres Erzgebirgsvorland, Zweckverband Wasserwerke Westerbirge

Die Mitglieder der Interessengemeinschaft Klärschlamm Entsorgung Ostsachsen haben zusammen ein jährliches Klärschlamm Aufkommen von ca. 4.500 t TM/a. Das Aufkommen der Mitglieder des Arbeitskreises Westsachsen beläuft sich auf ca. 15.000 t TM/a.

Gespräche wurden mit den Betreibern der Kläranlagen Dresden-Kaditz, Leipzig-Rosental sowie Freiberg, mit den zwei Kooperationen in Ost- und in Westsachsen (siehe Tabelle 1) sowie mit dem Zweckverband Wasser und Abwasser Vogtland (ZWAV) als Aufgabenträger der Abwasserbeseitigung von 86 Kläranlagen im Vogtlandkreis geführt.

Weiterhin wurden Entsorgungsunternehmen und Anlagenbetreiber befragt, soweit sie derzeit bzw. perspektivisch eine wesentliche Rolle bei der Entsorgung von Klärschlämmen in Sachsen innehaben (können). Konkret wurden Gespräche

mit der ehemaligen LAV Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH², der ehemaligen Veolia TVF Waste Solutions GmbH², der Lausitzer Energie Kraftwerke AG sowie dem Regionalen Abfallverband Oberlausitz-Niederschlesien (RAVON) geführt.

Hinsichtlich der Verfahren zur Phosphorrückgewinnung wurden die Informationen der umfangreichen Fachliteratur entnommen sowie durch einzelne Gespräche mit Experten und Verfahrensentwicklern untersetzt. So erfolgte zum Beispiel ein Gespräch mit der PARFORCE Engineering & Consulting GmbH zur PARFORCE-Technologie.

Im Rahmen der Erarbeitung des Berichtes zur Klärschlamm Entsorgung war auch die potenzielle Eignung von Deponien im Freistaat Sachsen als Langzeitlager für Klärschlammverbrennungsaschen zu prüfen. In diesem Zusammenhang wurden die Deponiebetreiber befragt, deren Deponien potenziell geeignet erschienen (siehe Kapitel 5.4.1). Zunächst wurden die Deponiebetreiber auf schriftlichem Weg befragt, ob Interesse besteht, ihre Deponie auf Eignung als Zwischenlager für Klärschlammmonoverbrennungsaschen prüfen zu lassen. Mit allen in Tabelle 2 aufgeführten Deponiebetreibern wurden hinsichtlich der Eignung der Deponien, den zu erfüllenden Rahmenbedingungen sowie zum Zeit- und Investitionsaufwand Gespräche geführt. Weiterhin erfolgten Gespräche mit der LDS als zuständiger Behörde.

Eine Übersicht der Daten und deren Quellen ist der nachfolgenden Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Datengrundlagen und deren Quellen

Daten	Quelle
Klärschlammfall und -entsorgungswege 2017	Statistischer Bericht – Entsorgung von Klärschlamm aus öffentlichen biologischen Abwasserbehandlungsanlagen im Freistaat Sachsen 2017 (Q 19 – j/17; StLA 2018a) Lagebericht 2018 zur kommunalen Abwasserbeseitigung und zur Klärschlamm Entsorgung im Freistaat Sachsen - Berichtszeitraum 2016/2017 (SMUL 2019) Gespräche mit den Kläranlagenbetreibern GK4b und GK5 bzw. den zwei Arbeitskreisen (ZKA Dresden-Kaditz, KW Leipzig-Rosenthal, ZKA Freiberg, Zweckverband Wasser und Abwasser Vogtland (ZKA Plauen, KA Rodewisch), Arbeitskreis Westsachsen (ZKA Chemnitz-Heinersdorf, ZKA Zwickau), Interessengemeinschaft Klärschlamm Entsorgung Ostsachsen [KA Görlitz-Nord, ZKA Zittau, KA Bautzen]) Aufbringungspläne 2013 bis 2018 (LfULG)
Klärschlammqualität 2017	Aufbringungsplan 2017 (LfULG 2018), Klärschlammkonzeption 2015 (Pfefferkorn et al., 2015) bzgl. Phosphorgehalte
geplante technologische Veränderungen bis 2032	Gespräche mit den Kläranlagenbetreibern GK4b und GK5 bzw. den Kooperationen in Ost- und Westsachsen
Entsorgungskapazitäten	Gespräche mit Entsorgungsunternehmen (ehemalige LAV Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH ² , ehemalige Veolia TVF Waste Solutions GmbH ² , Lausitzer Energie Kraftwerke AG, Regionalen Abfallverband Oberlausitz-Niederschlesien [RAVON])
Phosphorrückgewinnung	Expertenbefragungen, u. a. PARFORCE Engineering & Consulting GmbH, Veolia TVF Waste Solutions GmbH, Betreiber größerer Kläranlagen
Langzeitlagerung	Gespräche mit Deponiebetreibern (RAVON, PD-Industriegesellschaft GmbH, Faber Infra-Bau GmbH, WEV GmbH, Lausitz Energie Kraftwerke AG) Gespräche mit LDS

² Die LAV Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH und die TVF Waste Solutions GmbH sind seit dem 01.11.2019 zur Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH fusioniert (VEOLIA, 2019).

2 Rechtliche Rahmenbedingungen

2.1 Kreislaufwirtschaftsrecht

2.1.1 Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Die rechtliche Grundlage für die Entsorgung von Klärschlamm bildet das KrWG, das am 01. Juni 2012 in Kraft trat.

§ 11 KrWG bildet die Rechtsgrundlage für die Klärschlammverordnung (AbfKlärV).

Nach § 12 KrWG kann erstmals eine freiwillige regelmäßige Qualitätssicherung für die Verwertung von Klärschlamm eingerichtet werden.

Klärschlamm ist Abfall aus sonstigen Herkunftsbereichen im Sinne von § 17 Abs. 1 KrWG. Somit ist er grundsätzlich vom Abfallerzeuger – d.h. der Kläranlagenbetreiber - zu entsorgen. Nur soweit Klärschlamm nicht verwertet werden kann, sondern beseitigt werden muss, ist er dem zuständigen öRE zur Entsorgung zu überlassen. Von der Überlassungspflicht ausgenommen sind Klärschlämme, die in eigenen Anlagen beseitigt werden, sofern eine Überlassung an den öRE nicht aus überwiegendem öffentlichem Interesse erforderlich ist (§ 17 Abs. 1 Satz 3 KrWG). Außerdem ist der Klärschlamm nicht zu überlassen, wenn der zuständige öRE Klärschlamm von der Entsorgung ausgeschlossen hat. Das ist in der Regel der Fall.

Bisher hatten die Regelungen des § 17 Abs. 1 KrWG in Bezug auf Klärschlamm weder für die öRE noch für die Klärschlammherzeuger eine praktische Bedeutung, weil der überwiegende Teil der Klärschlämme verwertet wurde und damit keiner Überlassungspflicht unterlag. Unabhängig davon, ob die zuständigen öRE Klärschlamm von der Entsorgung ausgeschlossen haben, wurde ihnen in der Praxis kein Klärschlamm überlassen. Für das Gros der öRE in Sachsen ist das Thema der Klärschlamm Entsorgung daher praktisch ohne Bedeutung. Da die Novelle AbfKlärV neue Verwertungs-pflichten vorsieht, dürfte die Überlassung von Klärschlämmen gegenüber den öRE auch in Zukunft kein Thema sein.

Da bei der Klärschlamm Entsorgung oftmals Dritte beauftragt werden, ist § 22 KrWG für die Klärschlamm Entsorgung von Bedeutung. Dieser Paragraph besagt, dass die zur Verwertung und Beseitigung (von Abfällen) Verpflichteten Dritte mit der Erfüllung ihrer Pflichten beauftragen können. Allerdings bleibt ihre Verantwortlichkeit für die Erfüllung ihrer Pflichten von der Beauftragung unberührt und so lange bestehen, bis die Entsorgung endgültig und ordnungsgemäß abgeschlossen ist.

Bedeutung für die Klärschlamm Entsorgung könnten in Zukunft auch Grundsätze und Schlussfolgerungen im Abfallwirtschaftsplan des Freistaates Sachsen haben. Rechtsgrundlage für den Abfallwirtschaftsplan ist § 30 ff. KrWG. Im derzeit gültigen Abfallwirtschaftsplan, Fortschreibung 2016, sind allerdings weder Grundsätze noch Schlussfolgerungen mit Bezug zur Klärschlamm Entsorgung enthalten.

2.1.2 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung

Die Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017 ist eine Artikelverordnung, deren Art. 1 die Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung – AbfKlärV) zum 03.10.2017 novellierte. Art. 2 änderte die Deponieverordnung, Art. 3 umfasst Folgeänderungen. Art. 4 bis 6 ändern jeweils die AbfKlärV und betreffen die Einführung der Phosphorrückgewinnung. Die zeitliche Abfolge des Inkrafttretens der einzelnen Artikel ist in Art. 8 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung geregelt. Danach tritt Artikel 5 am 1. Januar 2029 und Artikel 6 am 1. Januar 2032 in Kraft.

Der Regelungsbereich der novellierten AbfKlärV erstreckt sich auf sämtliche bodenbezogenen Anwendungen, auf die Abgabe und Behandlung sowie Untersuchung von Klärschlamm.

Das wesentliche Ziel der Novelle ist die rechtliche Verankerung der Phosphorrückgewinnung und die Beendigung der bodenbezogenen Verwertung. Damit sollen zum einen Ressourcen geschützt und zum anderen die mit der boden-

bezogenen Verwertung verbundenen Schadstoffeinträge vermieden werden. Grundsatz der Regelungen der AbfKlärV ist die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen, die mehr als 20 g Phosphor je kg Klärschlamm-Trockenmasse enthalten. Ab dem Jahr 2029 gilt die Verpflichtung für Kläranlagen mit mehr als 100.000 Einwohnerwerten (EW). Für alle anderen Kläranlagen gilt die Verpflichtung ab dem Jahr 2032. Für Kläranlagen bis einschließlich 50.000 EW besteht weiterhin die Möglichkeit der bodenbezogenen Verwertung. Als weitere Ausnahme können mit Zustimmung der zuständigen Behörde anderweitige Wege der Abfallentsorgung (z. B. Zementwerke oder Thermische Abfallbehandlungsanlagen) genutzt werden. Dies gilt nicht für Klärschlämme mit mehr als 20 g Phosphor je kg Klärschlamm-Trockenmasse aus Kläranlagen mit mehr als 100.000 EW (ab 2029) bzw. mehr als 50.000 EW (ab 2032).

Für die Umsetzung der AbfKlärV in der Praxis hat die Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) Vollzugshinweise erarbeitet (LAGA, 2020).

Folgende relevante Änderungen der AbfKlärV erfolgten zum 03.10.2017:

- Der Geltungsbereich der novellierten AbfKlärV wurde auf alle Kläranlagenbetreiber sowie auch auf Maßnahmen des Landschaftsbaus erweitert (§ 1 Abs. 1 Nr. 1 AbfKlärV).
- Klärschlämme, die bodenbezogen verwertet werden sollen, sind nunmehr auch auf folgende Parameter zu untersuchen:
 - Arsen,
 - Chrom VI,
 - Thallium,
 - Eisen,
 - Benzo(a)pyren,
 - polyfluorierte Tenside sowie
 - PCDD/F + dl-PCB (TE-W HO 2005).
- Alle Analysen des Klärschlammes mit Ausnahme der Analysen auf organische Schadstoffe sind gemäß § 5 Abs. 1 AbfKlärV je 250 t Trockenmasse (TM), höchstens jedoch einmal monatlich durchzuführen. Kläranlagen, bei denen jährlich 750 t TM oder weniger anfallen, haben die Untersuchungen mindestens alle drei Monate durchzuführen.
- Böden sind vor der Aufbringung zusätzlich auf polychlorierte Biphenyle (PCB) und Benzo(a)pyren zu untersuchen (§ 4 Abs. 2 AbfKlärV). Zudem hat der Klärschlammhersteller die Bodenart der Aufbringungsfläche nach den Vorgaben der BBodSchV zu bestimmen (§ 4 Abs. 1 AbfKlärV).
- Die Grenzwerte der AbfKlärV wurden mit den teilweise strengeren Vorgaben der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) harmonisiert. Tabelle 3 zeigt die sich daraus ergebenden Grenzwerte.

Tabelle 3: Grenzwerte für Böden und Klärschlamm bei bodenbezogener Ausbringung gemäß § 7 Abs. 1 AbfKlärV (bodenbezogene Grenzwerte) und § 8 Abs. 1 AbfKlärV (klärschlammbezogene Grenzwerte)

Parameter	Boden			Klärschlamm
	Ton	Lehm/Schluff	Sand	
Kupfer	60 mg/kg TM	40 mg/kg TM	20 mg/kg TM	900 mg/kg TM
Zink	200 mg/kg TM	150 mg/kg TM	60 mg/kg TM	4.000 mg/kg TM
Blei	100 mg/kg TM	70 mg/kg TM	40 mg/kg TM	150 mg/kg TM
Cadmium	1,5 mg/kg TM	1,0 mg/kg TM	0,4 mg/kg TM	1,5 mg/kg TM
Chrom	100 mg/kg TM	60 mg/kg TM	30 mg/kg TM	-
Chrom VI	-	-	-	2,0 mg/kg TM
Nickel	70 mg/kg TM	50 mg/kg TM	15 mg/kg TM	80 mg/kg TM
Quecksilber	1,0 mg/kg TM	0,5 mg/kg TM	0,1 mg/kg TM	1,0 mg/kg TM
Arsen	-	-	-	40 mg/kg TM
Thallium	-	-	-	1,0 mg/kg TM
	Humusgehalt > 8 %		Humusgehalt ≤ 8 %	
AOX	-		-	400 mg/kg TM
PCB (6 Kongenere)	0,1 mg/kg TM		0,05 mg/kg TM	je 0,1 mg/kg TM
PCDD/F + dl-PCB (TE-W HO 2005)	-		-	30 ngTE/kg
Benzo(a)pyren	1,0 mg/kg TM		0,3 mg/kg TM	1,0 mg/kg TM
Perfluorierte Tenside (Summe PFOA, PFOS)	-		-	0,1 mg/kg TM

- Auf landwirtschaftlich genutzte Böden dürfen innerhalb eines Zeitraums von drei Jahren maximal fünf t Klärschlamm-TM je Hektar aufgebracht werden. Für landschaftsbauliche Maßnahmen sind bis zu zehn t Klärschlamm-TM zulässig, sofern auf den betreffenden Flächen sechs Jahre zuvor keine Klärschlämme ausgebracht wurden (§ 14 Abs. 1 AbfKlärV). Für Klärschlammgemische und -komposte gelten entsprechend angepasste maximale Aufbringungsmengen (§ 14 Abs. 2 AbfKlärV).
- Das Anzeigeverfahren wurde neu geregelt (§ 16 AbfKlärV). Der Klärschlammherzeuger bzw. der Kompost- oder Gemischhersteller hat das Auf- bzw. Einbringen von Klärschlamm auf Böden den zuständigen Behörden spätestens drei Wochen vor dem geplanten Ausbringungszeitpunkt unter Verwendung der Mustervorlagen (Anlage 3 Abschnitt 1 Nr. 1 bzw. Anlage 3 Abschnitt 2 Nr. 1 AbfKlärV) anzuzeigen.
- Schlämme aus Kläranlagen, in die Abwässer aus der industriellen Kartoffelverarbeitung eingeleitet werden, dürfen nicht mehr bodenbezogen verwertet werden (§ 15 Abs. 4 AbfKlärV).
- In folgenden Fällen ist gemäß § 15 Abs. 5 AbfKlärV die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen über die bisher geltenden Regelungen hinaus nicht mehr zulässig:
 - Anbauflächen für Hopfen,
 - Haus-, Nutz- oder Kleingarten.
- Das Ausbringungsverbot in Wasserschutzgebieten wurde auf die Schutzzone III ausgedehnt (§ 15 Abs. 6 AbfKlärV).
- Die Verwertung im Maisanbau zur Körnernutzung und zur Verwendung in der Biogaserzeugung ist grundsätzlich zulässig (§ 15 Abs. 5 Nr. 3 AbfKlärV).
- In der AbfKlärV sind zudem die Anforderungen an die Qualitätssicherungsmaßnahmen umfassend geregelt (§§ 19-31 AbfKlärV).

Berichtspflicht der Betreiber von Abwasserbehandlungsanlagen im Jahr 2023 (Art. 4 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung)

Klärschlammherzeuger, die im Jahr 2023 eine Abwasserbehandlungsanlage betreiben, haben gemäß Art. 4 Nr. 2 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3a Abs. 1 AbfKlärV) spätestens zum 31.12.2023 der zuständigen Behörde einen Bericht über die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen

- zur Sicherstellung der ab 1. Januar 2029 bzw. 1. Januar 2032 durchzuführenden Phosphorrückgewinnung,
- zur Auf- oder Einbringung von Klärschlamm auf oder in Böden oder
- zur sonstigen Klärschlammentsorgung vorzulegen.

Klärschlammherzeuger, welche eine Abwasserbehandlungsanlage nach dem 31.12.2023 in Betrieb nehmen, haben den Bericht spätestens sechs Monate nach Inbetriebnahme der Anlage vorzulegen. Gemäß § 3a Abs. 2 AbfKlärV haben dem vorgenannten Bericht außerdem Ergebnisse von Laboruntersuchungen des im Jahr 2023 angefallenen Klärschlammes auf den Phosphorgehalt und den Gehalt an basisch wirksamen Stoffen insgesamt beizulegen.

Zuständig für die Entgegennahme der Berichte sind gemäß § 20 Abs. 1 Sächsisches Kreislaufwirtschafts- und Bodenschutzgesetz (SächsKrWBodSchG) die unteren Abfall- und Bodenschutzbehörden. Gemäß § 2 Abs. 1 Nr. 15 Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landwirtschaft über Zuständigkeiten bei der Durchführung von Vorschriften des Kreislaufwirtschafts- und Bodenschutzrechts (SächsKrWBodSchZuVO) nimmt die obere Abfall- und Bodenschutzbehörde, also die LDS, die Entgegennahme wahr, wenn die an sich zuständige Gebietskörperschaft Verfahrensbeteiligte ist. Das trifft für die kreisfreien Städte Chemnitz, Dresden und Leipzig zu, die eigene Abwasserbehandlungsanlagen betreiben.

Für die Berichtserstellung gibt es in der AbfKlärV kein Berichtsformat. Um landes- bzw. bundesweit vergleichbare Angaben zu erhalten, wird von der LAGA im Rahmen der Vollzugshinweise zur Umsetzung der AbfKlärV ein Berichtsformat empfohlen (LAGA, 2020).

Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen (Art. 5 und 6 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung)

Art. 5 Nr. 4 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3 Abs. 1 und 2 AbfKlärV) führt zum 1. Januar 2029 als Regelfall die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen mit einem Phosphorgehalt (P-Gehalt) von ≥ 20 g/kg TM (also $\geq 2\%$) ein. Ausgenommen von dieser Pflicht sind Klärschlammherzeuger, die eine Kläranlagen mit einer genehmigten Ausbaugröße von bis zu 100.000 EW betreiben. Durch Art. 6 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung gilt ab dem 01.01.2032 diese Ausnahme nur noch für Kläranlagen von bis zu 50.000 EW. Sofern der Klärschlamm allerdings

- einen P-Gehalt von < 20 g/kg TM oder
- bereits eine Phosphorrückgewinnung um mindestens 50 % oder auf < 20 g/kg TM erfolgte,

kann der Klärschlamm einer anderweitigen Abfallentsorgung zugeführt werden. Eine Verwertung dieses Klärschlammes auf oder in Böden ist nicht zulässig.

Ein Phosphorrückgewinnungsverfahren im Sinne des Art. 5 Nr. 3 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 2 Abs. 4a AbfKlärV) ist „[...] jedes Verwertungsverfahren, durch das Phosphor

1. aus Klärschlamm oder
2. aus Klärschlammverbrennungsgas oder aus Klärschlammverbrennungsanlage oder Klärschlammverbrennungsanlage eingesetzten Klärschlammes oder aus kohlenstoffhaltigem Rückstand zurückgewonnen wird [...]“.

Verfahren, die von der flüssigen Phase oder dem Rohschlamm ausgehen, unterliegen dem Regelungsbereich der Abwasserverordnung. Diese Verfahren können auf den Kläranlagen angewandt werden, um den Phosphorgehalt im Klärschlamm auf < 20 g/kg TM zu reduzieren. Bei Überschreitung dieses Grenzwertes im Klärschlamm gelten, trotz des Einsatzes solcher Verfahren im Rahmen der abwassertechnischen Behandlung, die Rückgewinnungsanforderungen gemäß AbfKlärV.

Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm

Werden Klärschlämme, welche einen P-Gehalt von ≥ 20 g/kg TM aufweisen, vor der thermischen Behandlung einer Phosphorrückgewinnung unterzogen, so ist ein Verfahren anzuwenden, das den Phosphorgehalt des Klärschlammes

- um mindestens 50 % oder
- auf < 20 g/kg TM

reduziert (Art. 5 Nr. 6 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung [§ 3a Abs. 1 AbfKlärV]).

Die Vermischung von Klärschlämmen vor der Durchführung der Phosphorrückgewinnung ist nur dann zulässig, wenn alle Schlämme einen P-Gehalt von ≥ 20 g/kg aufweisen (Art. 5 Nr. 6 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung [§ 3a Abs. 2 AbfKlärV]).

Klärschlämme, welche einer ordnungsgemäßen Phosphorrückgewinnung unterzogen wurden, dürfen nicht bodenbezogen verwertet werden (Art. 5 Nr. 4 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung [§ 3 Abs. 3 AbfKlärV]).

Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsaschen oder kohlenstoffhaltigen Rückständen

Werden in einer Klärschlammverbrennungsanlage Klärschlämme eingesetzt, welche einen P-Gehalt von > 20 g/kg TM aufweisen, hat der Anlagenbetreiber gemäß Art. 5 Nr. 4 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3 Abs. 2 AbfKlärV) die Klärschlammverbrennungsasche oder die kohlenstoffhaltigen Rückstände entweder

- einer Phosphorrückgewinnung oder
- einer stofflichen Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehaltes der Verbrennungsasche oder des kohlenstoffhaltigen Rückstandes

zuzuführen.

Für die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlamm- oder kohlenstoffhaltigen Rückständen ist es unerheblich, ob der Klärschlamm in einer Mono- oder Mitverbrennungsanlage behandelt wurde. Klärschlammmitverbrennung im Sinne der AbfKlärV bezeichnet jedes Verfahren, das Klärschlämme zum Zweck der Vorbehandlung mitverbrennt. Weiterhin ist in Art. 5 Nr. 6 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3b Abs. 2 AbfKlärV) vorgeschrieben, dass der Betreiber einer Klärschlammmitverbrennungsanlage nach § 3 Abs. 1 Nr. 2 AbfKlärV diese mit Kohle oder Gas zu befeuern hat.

Wird eine Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlamm- oder kohlenstoffhaltigen Rückständen durchgeführt, ist gemäß Art. 5 Nr. 6 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3b Abs. 1 AbfKlärV) ein Verfahren anzuwenden, mit dem mindestens 80 % des enthaltenen Phosphors zurückgewonnen werden können.

Für die stoffliche Verwertung der Klärschlammverbrennungsaschen oder kohlenstoffhaltigen Rückstände sind die düngerechtlichen Vorgaben einzuhalten, andernfalls ist ein Verfahren nach Art. 5 Nr. 6 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3b Abs. 1 AbfKlärV) anzuwenden.

Aus Art. 5 Nr. 6 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3b Abs. 3 AbfKlärV) geht hervor, dass die Klärschlamm- oder kohlenstoffhaltigen Rückstände vor Durchführung eines Phosphorrückgewinnungsverfahrens bzw. der stofflichen Verwertung in einem Langzeitlager gemäß § 23 Abs. 6 DepV gelagert werden dürfen, sofern eine Vermischung mit anderen Stoffen bzw. Abfällen ausgeschlossen ist und die spätere Phosphorrückgewinnung bzw. stoffliche Verwertung im Sinne der Verordnung gewährleistet bleibt.

Gemäß Art. 5 Nr. 4 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3 Abs. 2 AbfKlärV) geht die Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung im Falle der thermischen Behandlung der Klärschlämme auf den Betreiber der Klärschlammverbrennungs- oder -mitverbrennungsanlage über.

Anforderungen an die Klärschlammentsorgung für Kläranlagen mit bis zu 50.000 Einwohnerwerten

Kläranlagen mit bis zu 50.000 EW dürfen die anfallenden Klärschlämme unter Beachtung der düngerechtlichen Vorgaben ausnahmsweise weiterhin bodenbezogen verwerten.

Mit Genehmigung der zuständigen Behörde können die Schlämme auch unmittelbar einer sonstigen (thermischen) Abfallentsorgung zugeführt werden. Sowohl die Option der bodenbezogenen Verwertung als auch die Option der anderweitigen Abfallentsorgung gelten unabhängig vom Phosphorgehalt des Klärschlammes. Auf freiwilliger Basis besteht die Möglichkeit, die Schlämme einer Phosphorrückgewinnung zuzuführen (Bundestag, 2017).

Die thermische Entsorgung ist für die Klärschlämme verpflichtend, die die Anforderungen für die bodenbezogene Verwertung der Klärschlämme gemäß § 8 AbfKlärV nicht einhalten.

Die nachfolgende Tabelle 4 zeigt in einer Übersicht die zukünftig möglichen Entsorgungswege für Klärschlämme.

Tabelle 4: Übersicht über die zukünftigen Entsorgungsmöglichkeiten für Klärschlämme (nach DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5, 2018)

Übersicht Entsorgungsmöglichkeiten ab 1. Januar 2029 ⁷⁾	Kläranlagen ≤ 100 000 EW (ab 1. Januar 2029) bzw. KA ≤ 50 000 EW (ab 1. Januar 2032)			Kläranlage > 100 000 EW (ab 1. Januar 2029) bzw. Kläranlagen > 50 000 EW (ab 1. Januar 2032)		
	< 20 g P/kg TM	≥ 20 g P/kg TM	Nach P-Abreicherung des Klärschlammes	< 20 g P/kg TM	≥ 20 g P/kg TM	Nach P-Abreicherung des Klärschlammes
Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemischen und -komposten auf und in Böden gemäß den gesetzlichen Vorgaben	✓	✓	X ⁴⁾	X	X	X
Thermische Vorbehandlung in Klärschlamm-(Mono-)Verbrennung bzw. in anderweitigen thermischen Verfahren bzw. Klärschlamm-Mitverbrennung ausschließlich mit Kohlefeuerung bzw. Gasfeuerung	✓ Verbrennungssasche bzw. kohlenstoffhaltiger Rückstand: keine P-Rückgewinnung erforderlich ¹⁾ , Deponierung zulässig	✓ ³⁾ Verbrennungssasche bzw. kohlenstoffhaltiger Rückstand: entweder ≥ 80 % P-Rückgewinnung oder Langzeitlagerung oder stoffliche Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts	✓ Verbrennungssasche bzw. kohlenstoffhaltiger Rückstand: keine P-Rückgewinnung erforderlich ⁵⁾ , Deponierung zulässig	✓ Verbrennungssasche bzw. kohlenstoffhaltiger Rückstand: keine P-Rückgewinnung erforderlich ¹⁾ , Deponierung zulässig	✓ ³⁾ Verbrennungssasche bzw. kohlenstoffhaltiger Rückstand: entweder ≥ 80 % P-Rückgewinnung oder Langzeitlagerung oder stoffliche Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts	✓ Verbrennungssasche bzw. kohlenstoffhaltiger Rückstand: keine P-Rückgewinnung erforderlich ⁵⁾ , Deponierung zulässig
Mitverbrennungsanlage ohne Beschränkung der Brennstoffe (zum Beispiel Altholz- und Ersatzbrennstoffe)	✓	X	✓	✓	X	✓
Anderweitige Abfallentsorgung (mit Zustimmung der Behörde), z. B. Zementwerke oder thermische Abfallbehandlungsanlagen	✓ ²⁾	✓ ²⁾	✓ ²⁾	✓ ⁶⁾	X	✓ ⁶⁾

- 1) Art. 5 Nr. 4 § 3 Abs. 2 zweiter Satz: „Von der Pflicht nach Satz 1 sind ausgenommen Betreiber einer Klärschlammverbrennungsanlage und Betreiber einer Klärschlammmitverbrennungsanlage, in denen ausschließlich Klärschlamm mit einem Phosphorgehalt von weniger als 20 g je kg TM eingesetzt wird.“
- 2) Art. 5 Nr. 4 § 3 Abs. 3: „Abweichend von Absatz 1 kann der Klärschlammherzeuger, der eine Abwasserbehandlungsanlage mit einer genehmigten Ausbaugröße von bis zu 100 000 Einwohnerwerten (bzw. nach Änderung mit Artikel 6: „bis zu 50 000“) betreibt, den in dieser Anlage anfallenden Klärschlamm unabhängig vom Phosphorgehalt nach Maßgabe der in den Teilen 2 und 3 genannten Anforderungen auf oder in Böden verwerten oder nach Zustimmung der zuständigen Behörde einer anderweitigen Abfallentsorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zuführen.“
- 3) Der Betreiber bleibt in der Pflicht bezüglich der Phosphorrückgewinnung. Er muss den beauftragten Entsorger bzw. Betreiber der Verbrennungsanlage verpflichten, eine ordnungsgemäße Phosphorrückgewinnung nach Maßgabe der AbfKlärV 2017 durchzuführen.
- 4) Art. 5 Nr. 4 § 3 Abs. 3 letzter Satz: „Eine Verwertung des Klärschlammes auf oder in Böden ist nicht zulässig, sofern der Klärschlamm einer ordnungsgemäßen Phosphorrückgewinnung nach Absatz 1 Nummer 1 zugeführt wurde.“ Schlämme mit einem Phosphorgehalt unter 20 g P/kg TM unterliegen den Vorgaben des Kreislaufwirtschaftsgesetzes und können stofflich oder thermisch verwertet werden ohne Pflicht zur P-Rückgewinnung.
- 5) Art. 5 Nr. 4 § 3 Abs. 2 letzter Satz: „Wurde bereits eine ordnungsgemäße Phosphorrückgewinnung aus einem Klärschlamm nach Absatz 1 Nummer 1 durchgeführt, ist im Fall einer Zuführung des Klärschlammes in eine Klärschlammverbrennungsanlage oder eine Klärschlammmitverbrennungsanlage eine Phosphorrückgewinnung nach Satz 1 nicht erforderlich.“
- 6) Art. 5 Nr. 4 § 3 Abs. 4: „Der Klärschlammherzeuger, der eine Abwasserbehandlungsanlage mit einer genehmigten Ausbaugröße von mehr als 100.000 Einwohnerwerten betreibt (bzw. nach Änderung mit Artikel 6: „bis zu 50.000“), kann den in dieser Anlage anfallenden Klärschlamm einer anderweitigen Abfallentsorgung zuführen, sofern der Klärschlamm
 - einen Phosphorgehalt von weniger als 20 Gramm je Kilogramm Trockenmasse aufweist oder
 - bereits einer Phosphorrückgewinnung nach Absatz 1 Nummer 1 unterzogen wurde.“
- 7) Zusätzlich: Art. 4 § 3a Abs. 2 (Art. tritt am 1. Januar 2023 in Kraft)
 - Im Kalenderjahr 2023 haben alle Klärschlammherzeuger (unabhängig von der Ausbaugröße!) Proben des anfallenden Klärschlammes auf den Phosphorgehalt und den Gehalt an basisch wirksamen Stoffen insgesamt, bewertet als Calciumoxid, untersuchen zu lassen. Diese Untersuchung ist im Kalenderjahr 2027 zu wiederholen.
 - Bis spätestens 31. Dezember 2023 haben alle Klärschlammherzeuger (unabhängig von der Ausbaugröße!) der zuständigen Behörde einen Bericht über die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Sicherstellung der ab 1. Januar 2029 durchzuführenden Phosphorrückgewinnung, zur Auf- oder Einbringung von Klärschlamm auf oder in Böden oder zur sonstigen Klärschlamm Entsorgung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes vorzulegen.

2.1.3 Verordnung über Deponien und Langzeitlager (DepV)

Die Deponieverordnung (DepV) regelt in § 23, dass bei der Errichtung und dem Betrieb von Langzeitlagern von Aschen oder kohlenstoffhaltigen festen Rückständen die gleichen Anforderungen gelten wie für Deponien der entsprechenden Klasse. Langzeitlager sind gemäß § 2 Nr. 22 DepV Anlagen zur Lagerung von Abfällen nach § 4 Abs. 1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) i. V. m. Nr. 8.14 des Anhangs 1 4. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) und bedürfen im Gegensatz zu Deponien demzufolge einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung. Gemäß § 23 Abs. 6 DepV kann für Aschen aus der Klärschlammverbrennung und aus der Klärschlammmitverbrennung sowie bei kohlenstoffhaltigen Rückständen aus der Vorbehandlung von Klärschlamm durch vergleichbare thermische Verfahren, die nicht gemeinsam und ohne Vermischung mit anderen Abfällen zum Zwecke einer späteren Rückgewinnung des Phosphors in einem Langzeitlager gelagert werden, eine Ausnahme von der Nachweispflicht über die gesicherte nachfolgende ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder gemeinwohlverträgliche Beseitigung gemäß § 23 Abs. 1 DepV zugelassen werden. Diese Ausnahme ist auf maximal fünf Jahre zu befristen; sie kann befristet verlängert werden.

In § 24 Abs. 2 DepV sind die Anforderungen an einen Sachverständigen für die Überprüfung der Einhaltung der Anforderungen des § 5 Abs. 3 Nr. 1 BImSchG, wonach auch nach Betriebseinstellung von dem Langzeitlager bzw. dessen Grundstück keine schädlichen Umwelteinwirkungen und sonstige Gefahren, erhebliche Nachteile und erhebliche Belästigungen für die Allgemeinheit und die Nachbarschaft hervorgerufen werden dürfen, geregelt.

2.2 Düngerecht

2.2.1 Düngegesetz (DüngG)

Das Düngegesetz legt die Grundsätze für die Anwendung und Inverkehrbringung von Düngemitteln fest und enthält die Ermächtigungen zum Erlass konkreter Vorgaben (siehe nachfolgende Verordnungen).

2.2.2 Düngeverordnung (DüV)

Die zuletzt in 2020 novellierte DüV enthält konkrete Vorgaben zur Stickstoff- und Phosphatbedarfsermittlung (§ 4 DüV). Des Weiteren dürfen mit organischen Düngemitteln einschließlich Klärschlämmen im Durchschnitt der betrieblichen Flächen jährlich pro Hektar max. 170 kg Gesamtstickstoff aufgebracht werden. Bei der Ausbringung von Klärschlammkompost darf die aufgebrachte Menge an Gesamtstickstoff im Durchschnitt der landwirtschaftlich genutzten Flächen des Betriebes in einem Zeitraum von drei Jahren 510 kg Gesamtstickstoff je Hektar nicht überschreiten (§ 6 Abs. 4 DüV). Phosphathaltige Düngemittel, einschließlich Klärschlämme, dürfen auf hochversorgten Böden (> 20 mg P₂O₅/100 g Boden CAL-Methode) nur in Höhe der Phosphatabfuhr durch die Ernteprodukte für maximal drei Jahre aufgebracht werden (§ 3 Abs. 6 DüV).

Von Bedeutung für die Ausbringung von Klärschlämmen auf landwirtschaftliche Flächen sind die zu beachtenden Sperrfristen. In § 6 Abs. 8 u. 9 DüV sind flächen- bzw. kulturbezogene Sperrfristen von bis zu einem halben Jahr festgelegt. Düngemittel mit wesentlichem Gehalt an Phosphat sowie Komposte dürfen in der Zeit vom 1. Dezember bis zum Ablauf des 15. Januar nicht aufgebracht werden (§ 6 Abs. 8 DüV).

Aufbringungsverbot gilt gemäß § 5 Abs. 1 DüV für überschwemmte, wassergesättigte, gefrorene oder schneebedeckte Böden.

Ab dem 01.01.2021 gelten besondere Regelungen in nitratbelasteten Gebieten (so genannte „Rote Gebiete“). Insbesondere sind in diesen Gebieten folgende Regelungen zu beachten (§ 13a DüV):

- Verringerung der zulässigen Höchstmenge für Stickstoff um 20 Prozent im Vergleich zum ermittelten Bedarf,
- Obergrenze für die Ausbringung von organischen und organisch-mineralischen Düngern in Höhe von 170 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr gilt flächengenau und nicht für den Durchschnitt aller Flächen,
- Erweiterung der Sperrfrist für die Ausbringung von Kompost vom 01.11 bis 31.01.

Stickstoffdüngung im Spätsommer/Herbst zu Winterraps, Wintergerste oder Zwischenfrüchte ohne Nutzung ist verboten. Für Winterraps gilt dieses Verbot nicht, wenn durch Bodenuntersuchung nachgewiesen ist, dass der verfügbare Stickstoffgehalt im Boden 45 kg/ha nicht überschreitet.

Stickstoffdüngung zu Sommerkulturen (Aussaat im Frühjahr) darf nur erfolgen, wenn im Herbst des Vorjahres eine Zwischenfrucht angebaut wurde.

2.2.3 Sächsische Düngerechtsverordnung (SächsDüReVO)

In der aktuell gültigen SächsDüReVO ist geregelt, dass auf Flächen, die in Nitrat-Gebieten liegen, die folgenden von der DüV abweichenden Anforderungen mit Bezug zu Klärschlamm/Klärschlammkomposten einzuhalten sind:

- Bodenuntersuchung auf verfügbaren Stickstoff einmal jährlich vor der Aufbringung wesentlicher Mengen an Stickstoff (mehr als 50 kg/(ha*a) Gesamtstickstoff),
- Verlängerung der Sperrfrist für die Aufbringung von Kompost auf den Zeitraum vom 15. November bis zum Ablauf des 31. Januar.

2.2.4 Stoffstrombilanzverordnung (StoffBiIV)

Die StoffBiIV ist seit dem 01.01.2018 in Kraft. Sie regelt die Anforderungen für die gemäß § 11a Abs. 2 DüngG zu erstellenden betrieblichen Stoffstrombilanzen. Zu bilanzieren sind die Nährstoffmengen an Stickstoff und Phosphor, die dem Betrieb durch die verschiedenen Einsatzstoffe, Tiere, Saatgut usw. zugeführt werden und die er als landwirtschaftliche und tierische Erzeugnisse, Düngemittel usw. abgibt.

Die mit Klärschlämmen oder Klärschlammkomposten dem landwirtschaftlichen Betrieb zugeführte Nährstoffmenge ist in der Stoffstrombilanz zu berücksichtigen.

2.2.5 Düngemittelverordnung (DüMV)

Die seit dem Jahr 2012 geltende DüMV regelt insbesondere, unter welchen Voraussetzungen Klärschlamm als Düngemittel in Verkehr gebracht werden darf. Zulässige Ausgangsstoffe sind ausschließlich Klärschlämme gemäß AbfKlärV. Zum einen für die Herstellung von Phosphatdünger aus Aschen der Klärschlammverbrennung (Anlage 2 Tabelle 6.2 Nr. 6.2.3 DüMV) und zum anderen für die direkte stoffliche Verwertung der Klärschlämme (Anlage 2, Tabelle 7 Nr. 7.4.3 und Tabelle 8 Nr. 8.1.3 DüMV). Dabei sind insbesondere folgende Vorgaben und Hinweise zu beachten:

- Zugabe von Kalk nur in einer Qualität, die zugelassenen Düngemitteln entspricht.
- Zugabe von Bioabfällen, nur im Rahmen der Aufbereitung (z. B. im Faulturm) und nur in einer Qualität, die der Bioabfallverordnung entspricht.
- Aufbereitung der Ausgangsstoffe nur mit Stoffen, die der notwendigen Abwasser- und Schlammbehandlung einschließlich Hygienisierung oder sonstigen notwendigen Behandlung dienen.
- Werden Polymere eingesetzt, die sich um weniger als 20 % in zwei Jahren abbauen, gilt eine Obergrenze von 45 kg Wirksubstanz je Hektar innerhalb von 3 Jahren. Der so behandelte Klärschlamm ist mit einer entsprechenden Anwendungsvorgabe zu kennzeichnen. Für Polymere auf Basis von Chitin oder Stärke gelten diese Anwendungs- und Kennzeichnungsvorgaben nicht.
- Keine Rückführung von Rechengut, Sandfanggut; keine Rückführung von Flotaten oder Fettabscheiderinhalten aus fremden Kläranlagen (jeweils auch nicht im Rahmen der Schlammaufbereitung).
- Angabe der bei der Aufbereitung zugegebenen Stoffe und des jeweiligen Zwecks der Zugabe (z. B. zur Konditionierung, Hygienisierung, Fällung), bei der Zugabe von Kalken Angabe des zugegebenen Anteils in %.

2.3 Immissionsschutzrecht

2.3.1 Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) und Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen (4. BImSchV)

Langzeitlager (siehe Kapitel 2.1.3) sind nach Immissionsschutzrecht zu genehmigen. In der 4. BImSchV sind in Abhängigkeit von Aufnahme- und Gesamtlagerkapazität verschiedene Optionen für eine Genehmigung festgelegt. Langzeitlager für Aschen aus der Klärschlammmono- und -mitverbrennung sowie von kohlenstoffhaltigen Rückständen aus der Vorbehandlung von Klärschlamm durch vergleichbare thermische Verfahren mit einer Gesamtlagerkapazität von 150 t oder mehr bedürfen eines Genehmigungsverfahrens gemäß § 10 BImSchG (mit Öffentlichkeitsbeteiligung). Verfügt das Langzeitlager über eine Aufnahmekapazität von 10 t oder mehr je Tag oder einer Gesamtlagerkapazität von 25.000 t oder mehr, unterliegt es zudem der Industrieemissions-Richtlinie³ (IED-Anlage).

IED-Anlagen haben insbesondere die Schlussfolgerungen zu den besten verfügbaren Techniken (BVT), die das zu berücksichtigende, branchenbezogene BVT-Merkblatt zusammenfasst, einzuhalten. Diese umfassen insbesondere:

- Maßnahmen zur Getrennthaltung der Abfälle,
- optimierte Lagerstandorte,
- angemessene Lagerkapazitäten und
- sicheren Lagerbetrieb.

Mit der Einstufung als IED-Anlage gehen zudem erweiterte Berichts- und Kontrollpflichten einher.

2.3.2 Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen (17. BImSchV)

Die 17. BImSchV vom 02.05.2013 ist bei der Errichtung und beim Betrieb von Anlagen zu beachten, in denen Abfälle (also auch Klärschlämme) verbrannt bzw. mitverbrannt werden. Sie enthält Emissionsgrenzwerte für Gesamtstaub, Schwefeloxide, Halogene, Stickstoffoxide, Quecksilber, Kohlenmonoxid, organische Verbindungen und Schwermetalle, die kontinuierlich zu überwachen und an die zuständige Behörde zu übermitteln sind. Grundsätzlich ist beim Verbrennungsvorgang eine Nachverbrennungstemperatur von 850°C für zwei Sekunden (nach der letzten Verbrennungsluftzuführung) einzuhalten, um eine sichere Zerstörung organischer Schadstoffe zu gewährleisten. Die anfallenden Verbrennungsaschen müssen einen Organikgehalt von weniger als 3 % TOC bzw. weniger als 5 % Glühverlust einhalten. Darüber hinaus sind bei Errichtung und Betrieb einer derartigen Anlage Anforderungen an

- die Vorsorge gegen schädliche Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen,
- die Bekämpfung von Brandgefahren,
- die Behandlung von Abfällen und
- die Nutzung der entstehenden Wärme

zu erfüllen.

³ Richtlinie 2010/75/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 24. November 2010 über Industrieemissionen (integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung) (Neufassung) (ABl. L 334 vom 17.12.2010, S. 17)

2.3.3 Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)

Als erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz enthält die TA Luft Anforderungen an die Immission und Emission von Luftschadstoffen durch immissionsschutzrechtlich genehmigungsbedürftige Anlagen.

Im Rahmen der Klärschlammbehandlung sind insbesondere Trocknungsanlagen von den Regelungen betroffen. Die bei der Trocknung entstehenden Abgase sind direkt am Entstehungsort zu erfassen und einer Abgasreinigungseinrichtung zuzuführen. Durch die Abgasreinigungsanlage sind Emissionswerte für Ammoniak, Gesamtstaub, gasförmige anorganische Chlorverbindungen, organische Stoffe (angegeben als Gesamtkohlenstoff) sowie geruchsintensive Stoffe einzuhalten.

Darüber hinaus ist die TA Luft auch bei der Genehmigung von Klärschlammverbrennungsanlagen und Kompostierungsanlagen relevant.

3 Ist-Stand des Klärschlammanfalls, der Klärschlammqualität und der Klärschlamm Entsorgung

3.1 Struktur der Abwasserbeseitigung im Freistaat Sachsen

Im Jahr 2017 gab es im Freistaat Sachsen 189 abwasserbeseitigungspflichtige Körperschaften (SMUL, 2019). Es handelte sich um Gemeinden mit vollständig eigenständiger Aufgabenwahrnehmung, Zweckverbände, Gemeinden mit teilweise eigenständiger Aufgabenwahrnehmung sowie Teilzweckverbände (Tabelle 5). Zweckverbände sind Formen der gemeinsamen Erfüllung kommunaler Aufgaben, hier der Abwasserbehandlung, auf Grundlage des Sächsischen Gesetzes über kommunale Zusammenarbeit (SächsKomZG). Wesensmerkmal eines Zweckverbandes ist, dass ihm die kommunale Aufgabe von seinen Mitgliedern übertragen wird. Aus der gemeinsamen Aufgabenerfüllung resultieren regelmäßig Synergien. Teilzweckverbände sind Zweckverbände, deren Mitglieder nur einen Teil ihrer Aufgaben übertragen haben (bspw. den Betrieb der Abwasserbehandlungsanlagen, nicht aber den Betrieb der Kanalisation). Entsprechend sind Gemeinden mit nur teilweise eigenständiger Aufgabenwahrnehmung die Mitgliedsgemeinden der Teilzweckverbände. Gemeinden mit teilweise eigenständiger Aufgabenwahrnehmung betreiben keine Abwasserbehandlungsanlagen und sind demzufolge nicht für die Entsorgung der anfallenden Klärschlämme verantwortlich.

Tabelle 5 zeigt die Verteilung der Abwasserbeseitigungspflichtigen auf die unterschiedlichen Organisationsformen im Hinblick auf die Klärschlamm Entsorgung. 52 % der Aufgabenträger sind Gemeinden und 48 % sind Zweckverbände und Teilzweckverbände. Damit ist festzustellen, dass der überwiegende Teil der Aufgabenträger kleinteilig strukturiert ist.

Tabelle 5: Verteilung der Abwasserbeseitigungspflichtigen mit Verantwortung für die Klärschlamm Entsorgung auf Organisationsformen (nach SMUL, 2019)

Organisationsform	Anzahl
Gemeinden mit vollständig eigenständiger Aufgabenwahrnehmung	86
Zweckverbände und Teilzweckverbände	78
Gesamt	164

Die räumliche Verteilung der Organisationsformen ist aus Abbildung 1 ersichtlich. Es wird deutlich, dass insbesondere in Ost- und Nordsachsen eine eher kleinteilige Struktur vorherrschend ist.

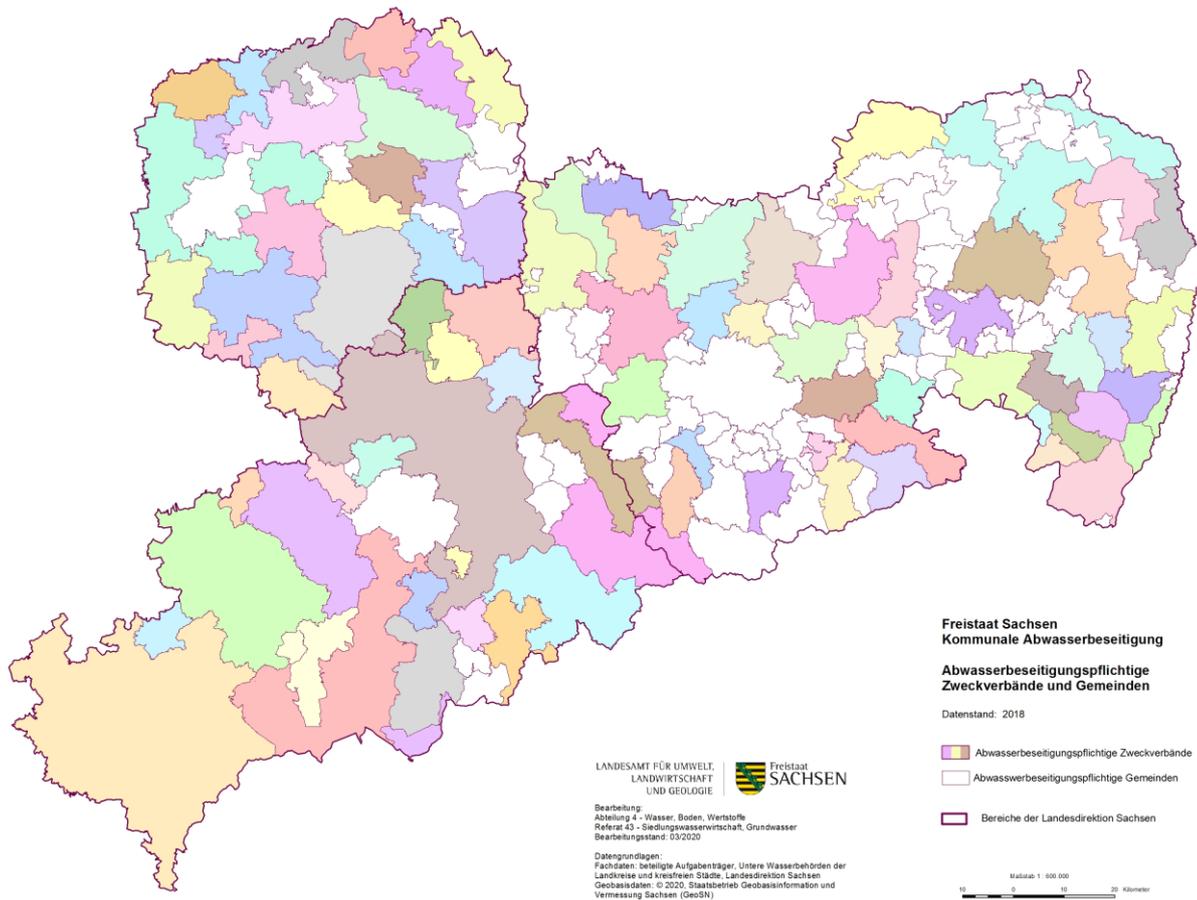


Abbildung 1: Organisationsformen der öffentlichen Abwasserbeseitigung im Freistaat Sachsen (Bildquelle: LfULG)

Im Jahr 2018 wurden im Freistaat Sachsen insgesamt 692 Kläranlagen (ab 50 EW) betrieben (LfULG, 2019). Die Verteilung der Kläranlagen auf die verschiedenen Größenklassen zeigt Abbildung 2.

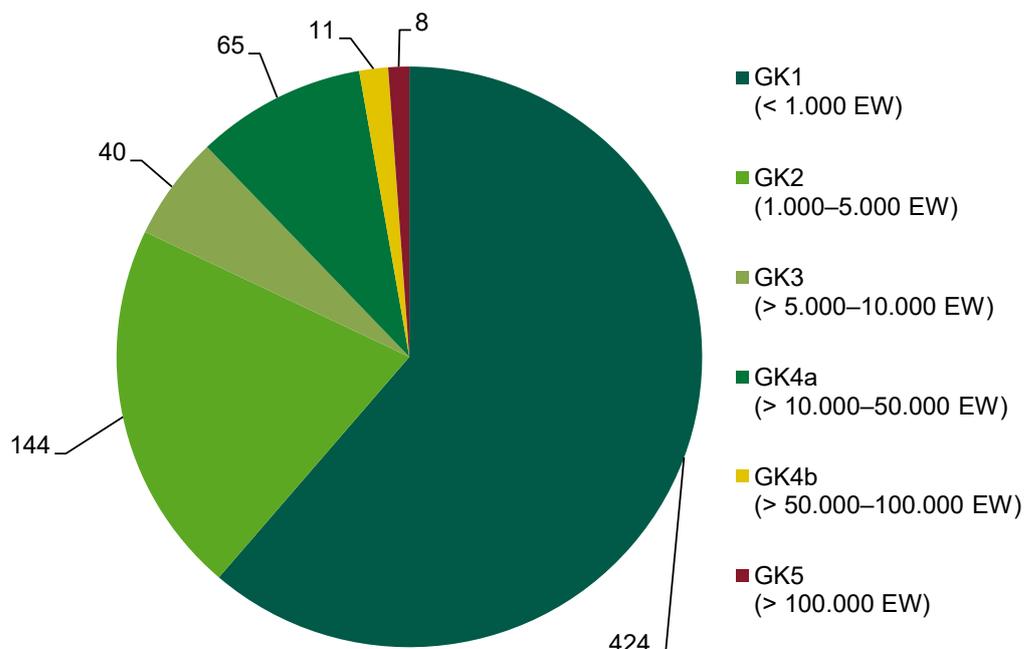


Abbildung 2: Verteilung der Kläranlagen im Freistaat Sachsen auf die unterschiedlichen Größenklassen (nach SMUL, 2019)

Für Kläranlagen > 50.000 EW (GK4b und GK5) gelten zukünftig die in Tabelle 4 Tabelle 4 dargestellte Pflichten zur Phosphorrückgewinnung sowie das damit einhergehende Verbot zur bodenbezogenen Verwertung der anfallenden Klärschlämme. Für Kläranlagen > 100.000 EW (GK5) besteht die Verpflichtung ab dem Jahr 2029, für Kläranlagen > 50.000 EW (GK4b) ab dem Jahr 2032. Wie aus Tabelle 6 ersichtlich, sind von den insgesamt 692 Kläranlagen im Freistaat Sachsen acht der GK5 und elf der GK4b zuzuordnen.

Tabelle 6: Kläranlagen der GK4b und 5 im Freistaat Sachsen (eigene Recherche)

Kläranlage	GK	genehmigte Ausbaukapazität [EW]	Aufgabenträger
ZKA Dresden-Kaditz	5	787.000	Landeshauptstadt Dresden
KW Leipzig-Rosental	5	550.000	Stadt Leipzig
ZKA Chemnitz-Heinersdorf	5	400.000	Stadt Chemnitz
ZKA Zwickau	5	143.000	Regional- Wasser-/Abwasser Zweckverband Zwickau/Werdau
KA Görlitz-Nord	5	140.000	Stadt Görlitz
ZKA Plauen	5	140.000	Zweckverband Wasser und Abwasser Vogtland
GKA Meißen	5	105.000	Abwasserzweckverband „Gemeinschaftskläranlage Meißen“
Zwischensumme GK5		2.265.000	
ZKA Freiberg	4b	100.000	Stadt Freiberg
KA Radeberg	4b	100.000	Abwasserzweckverband "Obere Röder"
KA Weidensdorf	4b	99.500	Abwasserzweckverband Lungwitztal-Steegenwiesen
ZKA Schönfeld	4b	99.350	Abwasserzweckverband "Oberes Zschopau- und Sehmatal"
KA Riesa	4b	97.000	Zweckverband Abwasserbeseitigung Oberes Elbtal
Zentrales Großklärwerk der MUEG mbH in Espenhain	4b	95.000	Abwasserzweckverband „Espenhain“
KA Hoyerswerda	4b	91.500	Stadt Hoyerswerda
ZKA Zittau	4b	85.000	Abwasserzweckverband "Untere Mandau"
KA Rodewisch	4b	60.000	Zweckverband Wasser und Abwasser Vogtland
KA Bautzen	4b	75.000	Abwasserzweckverband Bautzen
ZKA Schlematal	4b	73.500	Zweckverband Abwasser Schlematal (ZAST)
ZKA Panitzsch	4b	55.000	Abwasserzweckverband (AZV) für die Reinhaltung der Parthe
Zwischensumme GK4b		1.030.850	
Gesamtsumme GK5 und GK4b		3.295.850	

Die in Summe 19 Kläranlagen der GK4b und GK5 umfassen zusammen etwa 60 % der Einwohnerwerte aller Kläranlagen im Freistaat Sachsen und damit auch den Großteil der anfallenden Klärschlammengen. Allein die drei Kreisfreien Städte Chemnitz, Dresden und Leipzig erzeugten etwa 36 % der im Jahr 2017 angefallenen Gesamtklärschlammmenge (siehe Abbildung 4, Kapitel 3.2). Für die genannten Kläranlagen bestehen die im 2.1.2 beschriebenen besonderen Anforderungen an die Phosphorrückgewinnung aus den anfallenden Klärschlämmen.

Die räumliche Verteilung der Aufgabenträger mit Kläranlagen der GK4b und GK5 sowie die Einzugsgebiete der Abwasserbeseitigungspflichtigen zeigt die Karte im Anhang 2.

3.2 Klärschlammanfall

Im Jahr 2017 betrug der Klärschlammanfall aus öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen im Freistaat Sachsen 72.077 t TM/a. Die Entwicklung des Klärschlamm-aufkommens aus öffentlichen biologischen Abwasserbehandlungsanlagen seit dem Jahr 2013 zeigt die nachfolgende Abbildung 3.

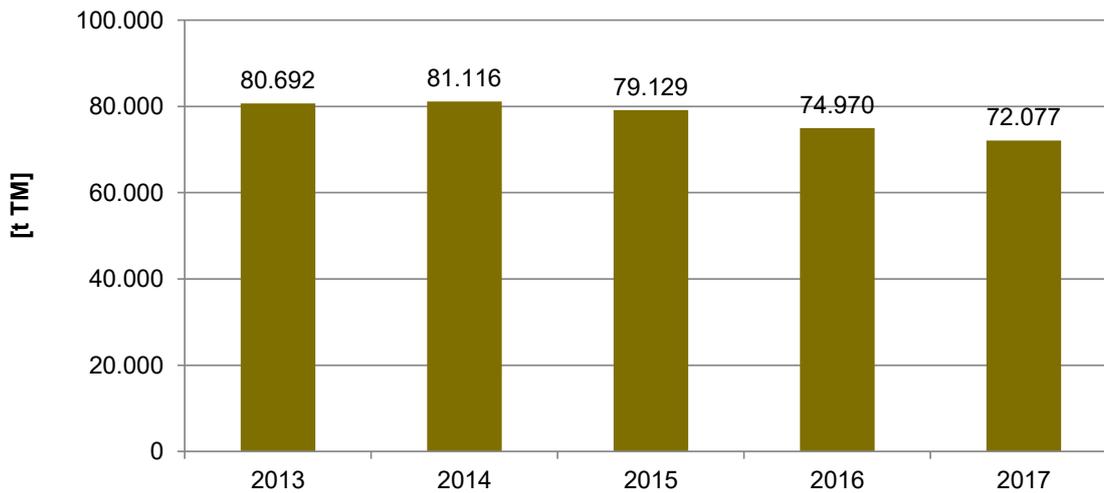


Abbildung 3: Klärschlammanfall aus öffentlichen biologischen Abwasserbehandlungsanlagen im Freistaat Sachsen 2013 bis 2017 (SMUL, 2019)

Aus Abbildung 3 geht hervor, dass die Klärschlammmengen seit dem Jahr 2014 rückläufig sind. Seit 2015 geht die Klärschlammmenge um 4 bis 5 % pro Jahr zurück.

Das Klärschlammaufkommen nach Landkreisen und kreisfreien Städten zeigen Abbildung 4 und Abbildung 5:

Landkreis, kreisfreie Stadt	Klärschlammmenge 2017 in Tonnen TM/a
Dresden, Stadt	12.199
Leipzig, Stadt	8.481
Mittelsachsen	7.190
Bautzen	6.293
Chemnitz, Stadt	5.493
Zwickau	5.297
Erzgebirgskreis	5.144
Leipzig	4.992
Görlitz	4.257
Vogtlandkreis	4.248
Meißen	3.568
Nordsachsen	3.360
Sächsische Schweiz- Osterzgebirge	1.555
Gesamt	72.077

Abbildung 4: Klärschlammfall 2017 in Sachsen nach Landkreisen und kreisfreien Städten in Tonnen TM/a (StLA, 2018)

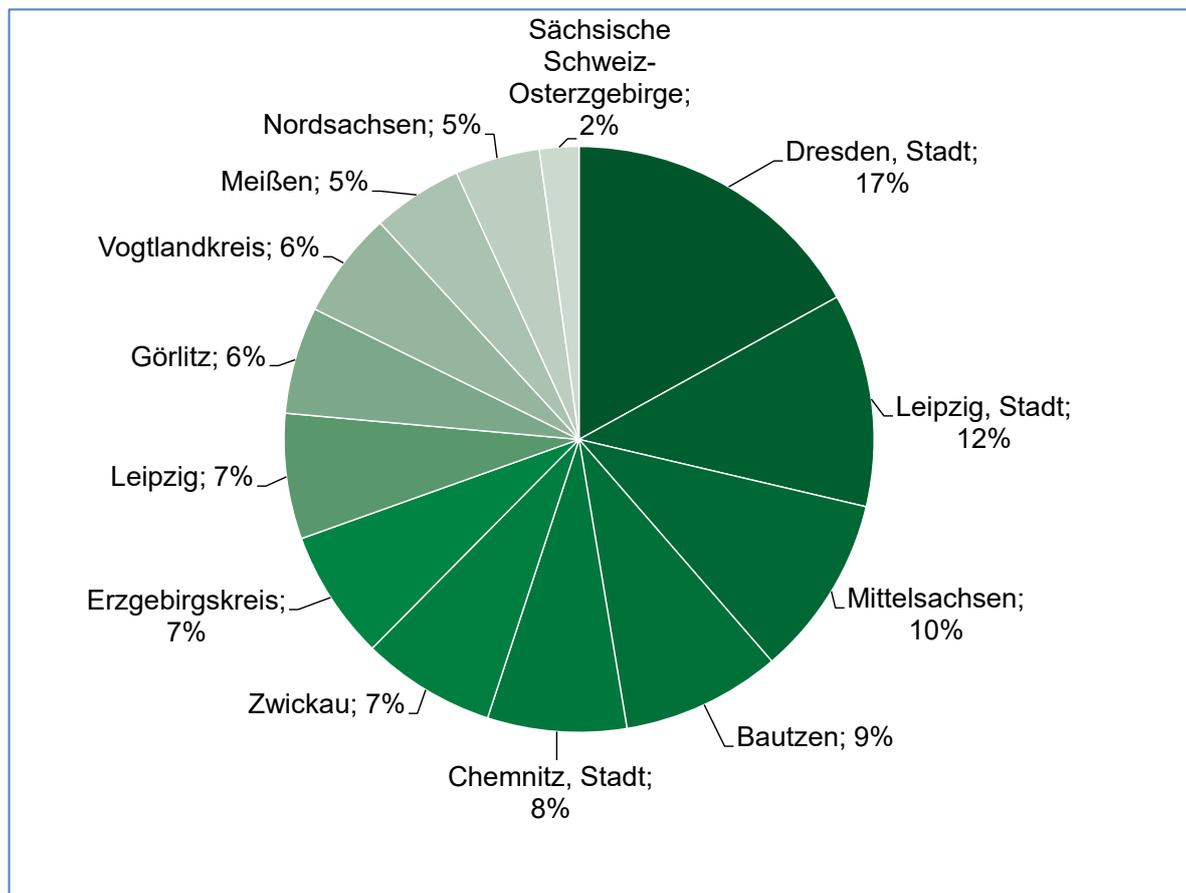


Abbildung 5: Klärschlammfall in Sachsen 2017 nach Landkreisen und kreisfreien Städten anteilig in Prozent (StLA, 2018)

3.3 Klärschlammqualität

3.3.1 Schadstoffgehalte landwirtschaftlich verwerteter Klärschlämme

Zu den Klärschlammqualitäten liegen lediglich die Angaben entsprechend § 3 Abs. 5 und 6 AbfKlärV (1992) zu landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämmen und Klärschlammkomposten vor. Nachstehende Aussagen zu den Schadstoffgehalten sächsischer Klärschlämme beruhen auf Informationen des Aufbringungsplans 2017 (LfULG, 2018a) und beziehen sich damit auf lediglich 10 % der im Jahr 2017 in Sachsen erzeugten Klärschlämme (siehe Abbildung 8).

Tabelle 7 zeigt die Schwermetall- und Schadstoffkonzentrationen der in Sachsen im Jahr 2017 landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme aus Kläranlagen in Sachsen. Die Gegenüberstellung mit den nach AbfKlärV n. F. geltenden Grenzwerten zeigt, dass auch diese durch die 2017 landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme eingehalten werden.

Tabelle 7: Schwermetall-/Schadstoffgehalte aller in Sachsen 2017 landwirtschaftlich verwerteten Klärschlammdünger aus sächsischen Kläranlagen (LfULG, 2018a)

Schwermetall bzw. Schadstoff	Einheit	Minimum	Mittelwert ^{a)}	Maximum	90. Perzentil	Grenzwerte (AbfKlärV 1992)	Grenzwerte (AbfKlärV 2017)	DüMV
Blei (Pb)	mg/kg TM	7,4	37,0	130,0	78,9			150
Cadmium (Cd)	mg/kg TM	0,33	0,78	1,42	1,36			1,5
Chrom (Cr)	mg/kg TM	13	26	59	49	900		-
Kupfer (Cu)	mg/kg TM	58	149	317	277	800		900
Nickel (Ni)	mg/kg TM	12,2	18,8	35,0	29,4			80
Quecksilber (Hg)	mg/kg TM	0	0,37	1	0,85			1
Zink (Zn)	mg/kg TM	288	625	1.600	1.118	2.500/2.000 ^{b)}	4.000	
Organisch gebundene Halogene (AOX)	mg/kg TM	51	104	321	212	500	400	
Polychlorierte Biphenyle (PCB) gesamt	mg/kg TM	0	0,012	0,05	0,024	0,2 ^{c)}	0,1 ^{c)}	
polychl. Dibenzodioxine u. -furane (PCDD/PCDF)	ngTE/kg TM	0	2,9	7,4	4,9	100		30
Perfluorooctansulfon-/ Perfluorooctansäure (PFOS+PFOA)	µg/kg TM	0	5,7	35,0	19,4			100

^{a)} gewichtetes Mittel (Aufbringungsmenge)

^{b)} abgesenkte Grenzwerte: wenn leichte Böden und Tongehalte < 5 % oder pH-Wert > 5 ≤ 6

^{c)} je Komponente (Kongener 28, 52, 101, 138, 153, 180)

3.3.2 Phosphorgehalt

Der Phosphorgehalt der im Jahr 2017 im Freistaat Sachsen landwirtschaftlich verwerteten Klärschlämme betrug im Mittel 17 g/kg TM. Die Schwankungsbreite reichte von 8 bis 55 g/kg TM (umgerechnete Phosphatgehalte aus LfULG, 2018a). Da eine umfassende Erhebung für alle Klärschlämme nicht vorliegt, werden die Ergebnisse der Klärschlammkonzepktion 2015 (Pfefferkorn et al., 2015) wiedergegeben. Das Bezugsjahr der damaligen Befragung war 2011. Nach dieser Befragung wiesen lediglich 14 % der angefallenen Klärschlämme Phosphorgehalte von < 20 g/kg TM auf. Von den 86 % der Klärschlämme mit ≥ 20 g/kg TM verfügten 62 % über P-Gehalte von > 30 g/kg TM. Während mehr als 80 % der Kläranlagen der GK5 und mehr als 90 % der Kläranlagen der GK4 P-Gehalte von ≥ 20 g/kg TM aufwiesen, lag dieser Anteil bei den kleineren Kläranlagen (GK2 und GK3) nur bei ca. 40 %. Die in Kläranlagen der GK2 erzeugten Klärschlämme wiesen generell geringe P-Gehalte von weniger als 30 g/kg TM auf.

Einzeldaten der Jahre 2016/17 hinsichtlich der P-Gehalte landwirtschaftlich verwerteter Klärschlämme (LfULG, 2019) stützen diese Aussage. Tendenziell sind die P-Gehalte der größeren Kläranlagen höher als die der kleinen Kläranlagen. Die P-Gehalte der Klärschlämme der Kläranlagen der GK4 und GK5 überschreiten überwiegend den Wert von 20 g P/kg TM.

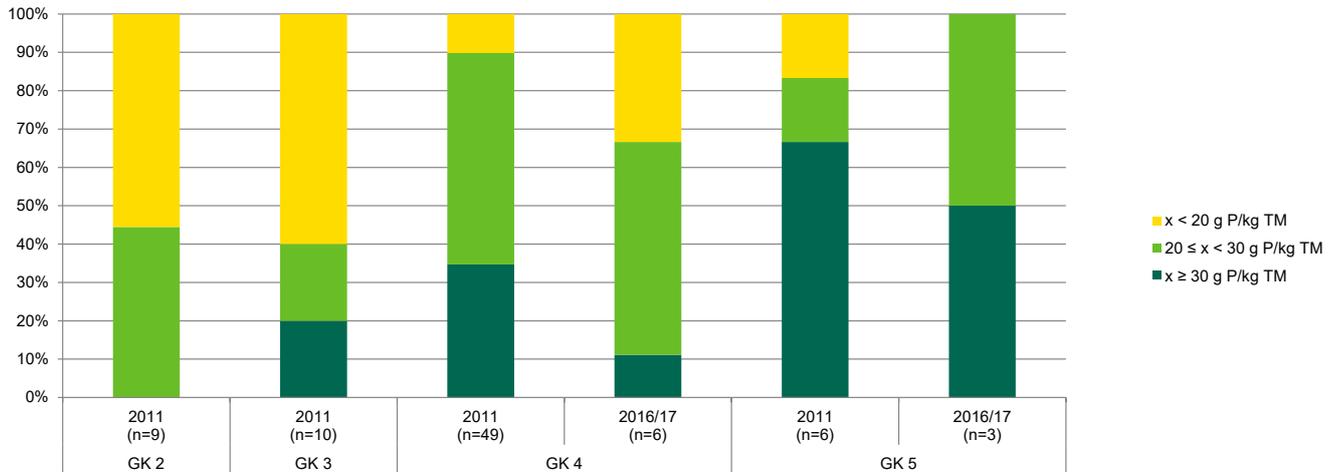


Abbildung 6: Phosphorgehalte sächsischer Klärschlämme, geordnet nach Größenklassen (2011: Pfefferkorn et al., 2015 [n = 74 Kläranlagen]; 2016/17: LfULG, 2019 [n = 9 Kläranlagen])

3.4 Bisherige Entsorgungswege für Klärschlämme im Freistaat Sachsen

Die nachfolgend dargestellten Entsorgungswege beziehen sich auf die vom StLA erhobenen Daten zur Entsorgung von Klärschlämmen aus öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen auf Grundlage des Umweltstatistikgesetzes (UStatG). Die in Klammern angegebenen Beispiele richten sich entsprechend nach den im StLA-Bericht verwendeten Erläuterungen.

Alle örE haben die Sammlung und den Transport von Klärschlämmen satzungsrechtlich ausgeschlossen. Ebenso haben die meisten örE mit Ausnahme des Zweckverbandes Abfallwirtschaft Westsachsen (ZAW), des RAVON sowie des Vogtlandkreises die Entsorgung von Klärschlämmen ausgeschlossen (siehe Anhang 3).

Der überwiegende Teil des anfallenden Klärschlammes (92,5 %) wurde im Jahr 2017 direkt, d. h. ohne Abgabe an andere Abwasserbehandlungsanlagen oder an Zwischenlager, entsorgt. Für die direkte Entsorgung sind folgende Entsorgungswege von Bedeutung:

- thermische Entsorgung,
- stoffliche Verwertung
 - in der Landwirtschaft nach AbfKlärV,
 - in landschaftsbauliche Maßnahmen (z. B. Kompostierung und Rekultivierung) nach AbfKlärV,
- durch sonstige stoffliche Verwertung (z. B. Vergärung, Klärschlammvererdung),
- sonstige direkte Entsorgung (z.B. Trocknungsanlagen).

Abbildung 7 zeigt für das Jahr 2017 die in den einzelnen Entsorgungswegen entsorgten Klärschlammengen.

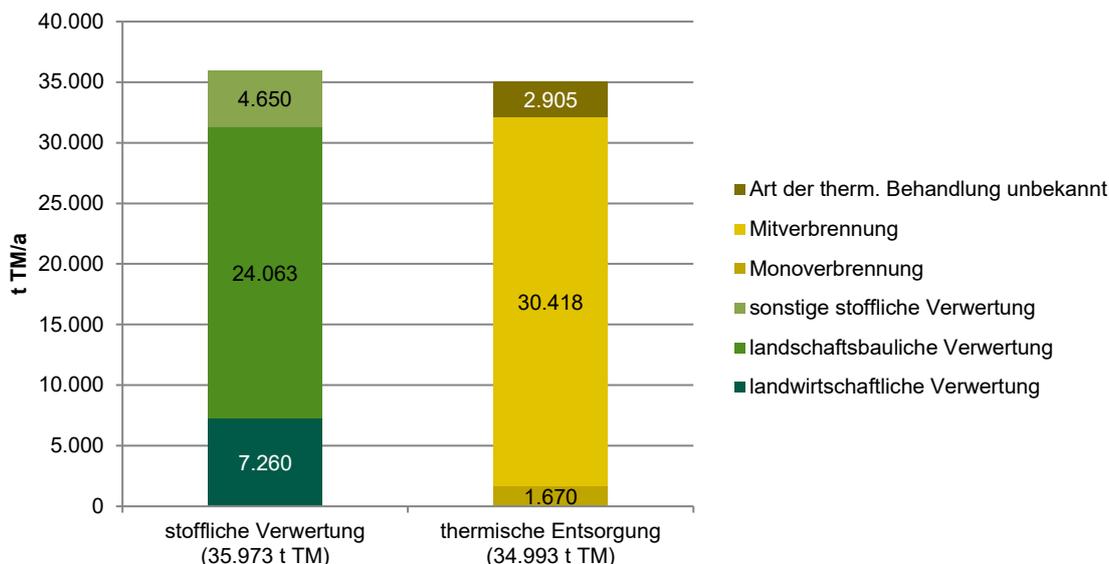


Abbildung 7: Entsorgungswege für Klärschlämme im Jahr 2017 (SMUL 2019)

Im Jahr 2017 wurden insgesamt 70.996 t TM an angefallenen Klärschlämmen direkt entsorgt. 34.993 t TM (49 %) der entsorgten Klärschlämme wurden einer thermischen Entsorgung zugeführt. Davon wurden 30.418 t TM (95 %) mitverbrannt. 24.063 t TM (34 %) der Klärschlämme wurden bei landschaftsbaulichen Maßnahmen stofflich verwertet. Auf landwirtschaftlichen Flächen wurden im Jahr 2017 noch 7.260 t TM (10 %) der Klärschlämme ausgebracht. Die Klärschlammmenge, die einer sonstigen stofflichen Verwertung zugeführt wurde, betrug 4.650 t TM (7 %). Die sonstige direkte Entsorgung, unter die auch die Abgabe von Klärschlamm an Trocknungsanlagen fällt, hatte im Jahr 2017 keine Bedeutung. 1.081 t TM wurden an andere Abwasserbehandlungsanlagen abgegeben oder zwischengelagert. In andere Bundesländer wurden im Jahr 2017 insgesamt 27 % (SMUL 2019) exportiert.

In den letzten Jahren haben sich die Entsorgungswege der Klärschlämme deutlich verändert. Die Entwicklung seit dem Jahr 2013 zeigt Abbildung 8.

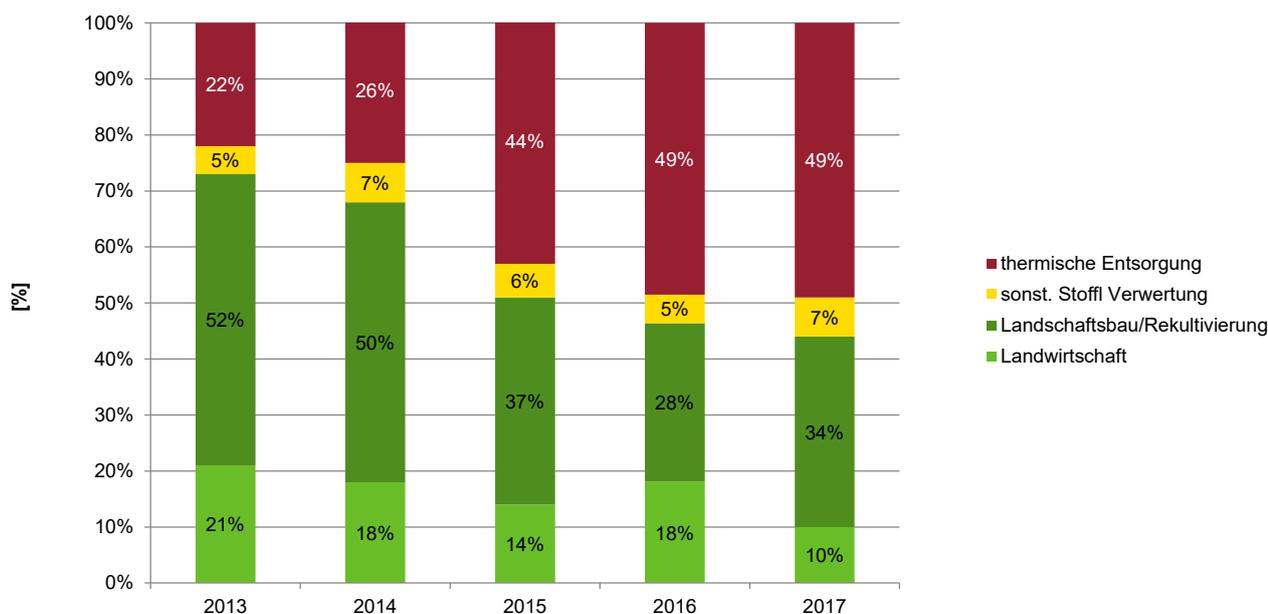


Abbildung 8: Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung 2013 bis 2017 (SMUL 2019)

2017 betrug die ackerbaulich genutzte Fläche im Freistaat Sachsen 704.559 ha (StLA 2018). Zuletzt wurden lediglich 0,5 % dieser Fläche zur Ausbringung von Klärschlämmen genutzt. Tabelle 8 zeigt die Entwicklung der Aufbringungsmengen an Klärschlamm-TM von 2013 bis 2017.⁴ Die landwirtschaftliche Verwertung war in diesem Zeitraum um 5,3 % rückläufig. Die zur Klärschlammausbringung genutzte Fläche ist im gleichen Zeitraum um 17,6 % zurückgegangen. Die im Freistaat Sachsen erzeugte Klärschlammmenge, die landwirtschaftlich verwertet wurde, ist im gleichen Zeitraum um 12,1 % gesunken, während die aus anderen Bundesländern importierte Menge um 38,6 % angestiegen ist. Damit hat sich der importierte Anteil an der aufgebrachten Klärschlammmenge von 13,3 % (2013) auf 19,5 % (2017) merklich erhöht.

Tabelle 8: Aufbringungsmengen und -flächen für Klärschlammprodukte im Freistaat Sachsen in den Jahren 2013 bis 2018 (LfULG 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018a)

	2013	2014	2015	2016	2017	Veränderung zwischen 2013 und 2017
aufgebrachtes Klärschlammprodukt [t TM]	14.566	14.336	11.453	14.446	13.791	-5,3 %
davon aus Sachsen [t TM]	12.628	11.315	8.831	11.530	11.105	- 12,1 %
davon aus anderen Bundesländern [t TM]	1.938	3.021	2.622	2.916	2.686	+38,6 %
für die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Anspruch genommene Ackerfläche [ha]	4.162	4.006	2.920	3.718	3.428	- 17,6 %
mittlere Aufbringungsmenge [t TM/ha]	3,5	3,6	3,9	3,9	4,0	+ 14,3 %

Das Verhältnis der direkten Aufbringung von Klärschlamm zur Aufbringung von Klärschlammkomposten auf landwirtschaftliche Flächen zeigt Abbildung 9. Im Jahr 2017 überwog erstmalig die Verwertung von Klärschlammkomposten gegenüber der direkten Klärschlammaufbringung (siehe Kapitel 6.3).

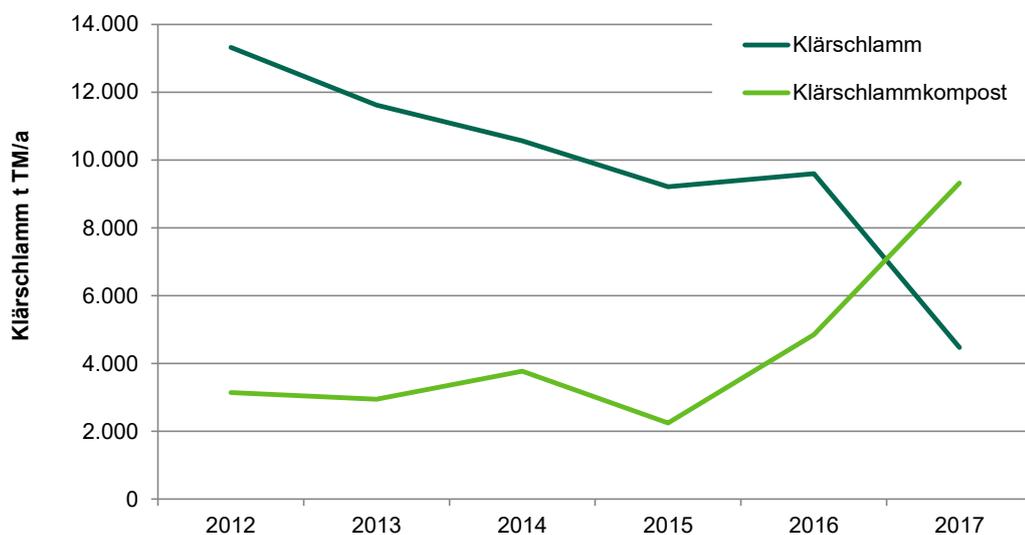


Abbildung 9: Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlämmen und Klärschlammkomposten im Freistaat Sachsen im Zeitraum 2012 bis 2017 [t TM/a] (LfULG, 2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018a)

⁴ Aufgrund der unterschiedlichen Datengrundlage differieren die Mengenangaben zwischen den Lageberichten und den Aufbringungsplänen. Grundlage der Lageberichte sind die durch das StLA erhobenen Daten zur Entsorgung von Klärschlamm aus öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen im Freistaat Sachsen auf Basis des UStatG. Die Aufbringungspläne basieren auf den durch das Anzeige- und Lieferscheinverfahren gemäß § 7 AbfKlärV (1992) ermittelten Mengen. Für die Darstellung der landwirtschaftlichen Verwertung werden für den vorliegenden Bericht die Aufbringungspläne genutzt, da diese auch die Aufbringung von Klärschlammkomposten auf landwirtschaftliche Flächen ausweisen, während die Kompostierung in den Lageberichten pauschal der landschaftsbaulichen Verwertung zugeschlagen wird.

Der Anteil der Klärschlämme, die thermisch entsorgt werden, nimmt seit dem Jahr 2013 kontinuierlich zu. Die Entsorgungswege von Klärschlamm aus ausgewählten Kläranlagen der GK5 und GK4b im Jahr 2017 zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Entsorgungswege ausgewählter Kläranlagen der GK5 und GK4b (eigene Recherche, 2019)

Kläranlage	GK	Klärschlammmenge 2017 [t TM/a]	Entsorgungsweg
ZKA Dresden-Kaditz	5	12.199	30 % stoffliche Verwertung 70 % thermische Entsorgung
KW Leipzig-Rosental	5	8.481	100 % thermische Entsorgung
ZKA Chemnitz-Heinersdorf	5	5.493	100 % stoffliche Verwertung
ZKA Zwickau	5	3.600	100 % thermische Entsorgung
KA Görlitz-Nord	5	1.000	100 % thermische Entsorgung
ZKA Plauen	5	1.725	100 % thermische Entsorgung
GKA Meißen	5	1.450	100 % thermische Entsorgung
KA Weidendorf	4b	1.450	100 % thermische Entsorgung
ZKA Freiberg	4b	1.350	100 % thermische Entsorgung
ZKA Schönfeld	4b	1.000	100 % thermische Entsorgung
KA Riesa	4b	820	stoffliche/thermische Entsorgung
ZKA Zittau	4b	970	50 % stoffliche Verwertung (Landschaftsbau) 50 % thermische Entsorgung
KA Rodewisch	4b	1.225	100 % thermische Entsorgung
KA Bautzen	4b	790	60 % stoffliche Verwertung (Landschaftsbau) 40 % thermische Entsorgung
ZKA Panitzsch	4b	660	stoffliche/thermische Entsorgung

4 Prognose des Klärschlammanfalls

4.1 Methodik der Prognose

Für die Prognose des Klärschlammanfalls sind vier Einflussfaktoren zu berücksichtigen:

- Bevölkerungsentwicklung,
- Entwicklung des Anschlussgrades an die öffentliche Abwasserentsorgung,
- Veränderungen des Anschlusses industrieller und gewerblicher Einleiter und
- Modernisierungsmaßnahmen auf Kläranlagen mit der Zielstellung der Reduzierung der Klärschlammmengen.

Nachfolgend werden die Einflussfaktoren erläutert und die Prognose auf Basis dieser Faktoren dargestellt.

4.1.1 Bevölkerungsentwicklung

Für die Bewertung der Klärschlammmengenentwicklung im Freistaat Sachsen wird die sächsische Bevölkerungsvorausberechnung (StLA, 2016) betrachtet. Die 6. Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung (6. RBV) wurde im Jahr 2016 in zwei Varianten erstellt. In der oberen Variante (Variante 1) der 6. RBV wird die voraussichtliche Bevölkerungsentwicklung unter besonderer Berücksichtigung der Zuwanderung aus jüngster Zeit modellhaft quantifiziert. In der unteren Variante (Variante 2) sind die Annahmen aus der 13. Koordinierten Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes (Variante G1-L1-W2) umgesetzt.

Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, dass in der oberen Variante (Variante 1, rot dargestellt) die Bevölkerung zunächst bis 2020 auf 4,2 Mio. Einwohner anwachsen wird. Danach wird sie bis 2030 unter den heutigen Stand (4,1 Mio. Einwohner, Stand 2015) auf knapp 4,0 Mio. Einwohner zurückgehen. In der unteren Variante (Variante 2, orange dargestellt) geht die Bevölkerung bis 2030 kontinuierlich bis auf 3,85 Mio. Einwohner zurück. Der Bevölkerungsrückgang verläuft nach neuen Erkenntnissen langsamer als in der 2011 veröffentlichten 5. RBP (im Diagramm grün dargestellt) ermittelt.

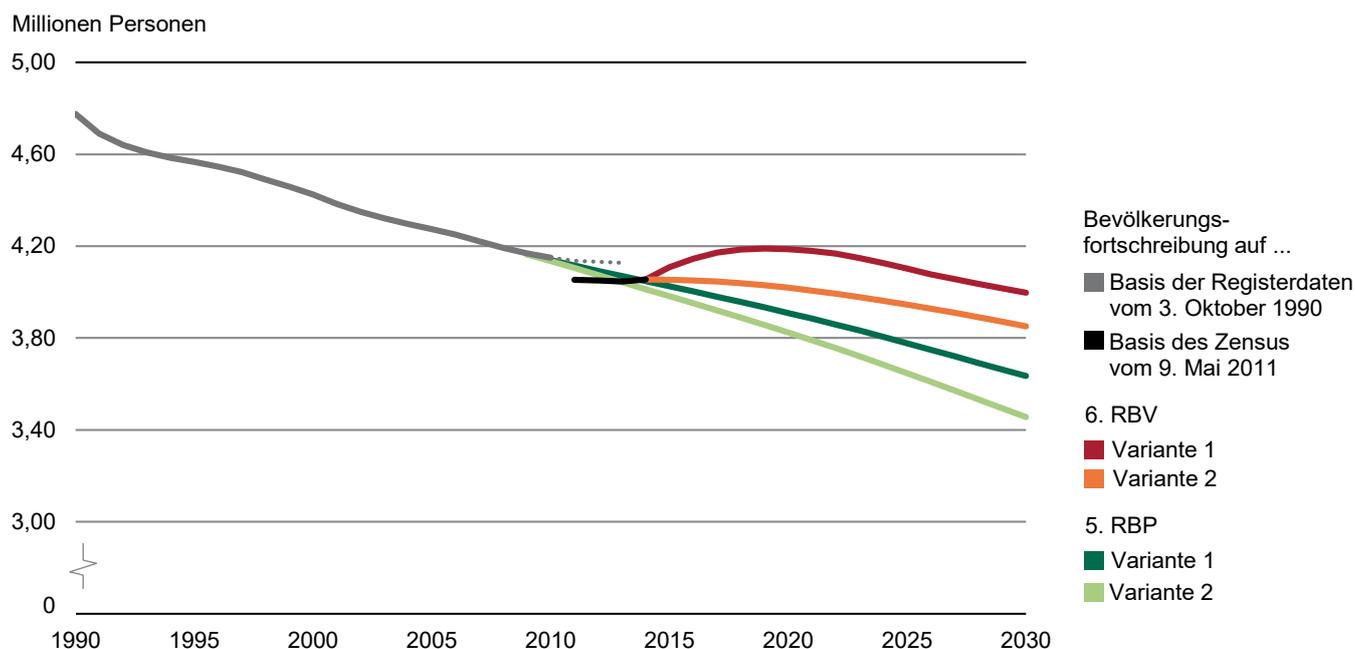


Abbildung 10: Bevölkerungsvorausberechnung im Freistaat Sachsen 1990 bis 2030 (StLA, 2016)

Legt man die Bevölkerung des Freistaates Sachsen des Jahres 2018 zugrunde, wird ersichtlich, dass die Variante 2 der 6. RBV näher an der tatsächlichen Bevölkerungsentwicklung liegt als die Variante 1. Mit Stichtag 30.09.2018 lebten im

Freistaat Sachsen 4.076.957 Einwohner (StLA, 2019a). Die Schätzung in Variante 1 beläuft sich für 2018 auf 4.185.200 Einwohner, die der Variante 2 auf 4.038.900 Einwohner (StLA, 2016). Für die Prognose wird insofern die Variante 2 genutzt und die absolute Zahl der Einwohner der Variante 2 für jedes Jahr um die Differenz des Jahres 2018 in Höhe von 38.000 Einwohnern erhöht. Tabelle 10 zeigt die entsprechend angepasste Bevölkerungsprognose. Da die Bevölkerungsvorausberechnung des StLA nur Daten bis 2030 enthält, wurden die Bevölkerungsdaten für 2031 und 2032 auf Basis der Vorjahresentwicklung extrapoliert.

Tabelle 10: Angepasste Bevölkerungsprognose für den Freistaat Sachsen von 2018 bis 2032 in Mio. Einwohner (nach StLA, 2016)

2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025
4.076,9	4.068,0	4.057,2	4.044,2	4.030,4	4.015,6	3.999,9	3.983,4
2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	
3.965,9	3.947,6	3.928,7	3.909,2	3889,4	3.869,4	3.849,2	

Aufgrund der steigenden Bevölkerungszahl der Stadt Leipzig wird das Klärwerk Leipzig-Rosenthal erweitert. Die Kapazität wird in den Jahren 2020/21 von 550.000 auf 750.000 EW erhöht (Jentzsch, 2019). Die damit verbundene Erhöhung der anfallenden Klärschlammengen ist im Rahmen der Prognose der Klärschlammengenentwicklung über die Bevölkerungsentwicklung bereits abgedeckt.

4.1.2 Anschlussgrad an die öffentliche Abwasserentsorgung

Der Anschlussgrad der Bevölkerung an öffentliche Abwasserbehandlungsanlagen ist in Sachsen mit 90 % der Bevölkerung auf einem hohen Stand. Es wird davon ausgegangen, dass für rund 9 % der sächsischen Bevölkerung insbesondere im ländlichen Raum Kleinkläranlagen oder abflusslose Gruben nach den Planungen der kommunalen Aufgabenträger dauerhaft Bestandteil der kommunalen Abwasserbeseitigung sein werden (SMUL 2019). Aufgrund dessen wird davon ausgegangen, dass der für den Klärschlammfall relevante Anschlussgrad der Bevölkerung an kommunale Kläranlagen innerhalb des Prognosezeitraums weiterhin bei 90 % liegen wird.

4.1.3 Veränderungen des Anschlusses industrieller und gewerblicher Einleiter

Über die Veränderung des Anschlusses industrieller und gewerblicher Einleiter an kommunale Kläranlagen liegen keine Daten vor. Es ist zu vermuten, dass aufgrund von Industrieansiedlungen innerhalb des Prognosezeitraums einzelne Einleiter zusätzlich angeschlossen bzw. Kläranlagen punktuell erweitert werden (z.B. Kläranlage Penig von 9.000 auf 40.000 EW bis Dezember 2020 (Medienservice Sachsen, 2018)). Der Einfluss geplanter Industrieansiedlungen bzw. der Schließung von Industriestandorten auf den Abwasseranfall innerhalb des Prognosezeitraums ist nicht bekannt. Zudem wird der Einfluss dieser Bestandsveränderungen im Vergleich zum Gesamtklärschlammfall als gering eingeschätzt. Aus diesen Gründen wird der Einfluss dieses Faktors auf den prognostizierten Gesamtklärschlammfall nicht berücksichtigt.

4.1.4 Modernisierung von Kläranlagen mit der Zielstellung der Reduzierung der Klärschlammengen

Aus den Gesprächen mit den Betreibern der größeren Kläranlagen ergaben sich nur wenige Hinweise auf geplante Modernisierungsmaßnahmen, welche Einfluss auf die Klärschlammengen haben werden. Die meisten größeren Kläranlagen haben derartige Maßnahmen (insbesondere Klärschlammbehandlung durch Faulung) bereits abgeschlossen. Insgesamt wird durch weitere Modernisierungsmaßnahmen eine geringere Reduzierung der Klärschlammmenge als in den vergangenen Jahren erwartet. Für weitere zu erwartende Optimierungen auf den Kläranlagen wurde jährlich pauschal eine Verminderung des Klärschlammfalls von 0,5 % angesetzt.

4.2 Prognose des Klärschlammanfalls bis 2032

Für die Prognose wurde die angepasste Bevölkerungsprognose für den Freistaat Sachsen (siehe Tabelle 10) zugrunde gelegt, die einen Bevölkerungsrückgang um 4,3 % für den Zeitraum 2018 bis 2032 erwartet. Im Zeitraum 2012 bis 2017 ist der Klärschlammanfall im Mittel um 1,5 % pro Jahr zurückgegangen (siehe Kapitel 0), während die sächsische Bevölkerung im gleichen Zeitraum um 31.104 Einwohner (+ 0,8 %) gewachsen ist (StLA, 2019b). Der Rückgang der Klärschlammmengen ist allerdings insbesondere auf Modernisierungsmaßnahmen wie die Errichtung von Klärschlammfaulungsanlagen (z. B. Klärschlammfaulung der ZKA Dresden-Kaditz, Inbetriebnahme September 2015) zurückzuführen.

Aus diesen Ansätzen ergibt sich die in Abbildung 11 dargestellte Prognose des Klärschlammanfalls für den Freistaat Sachsen.

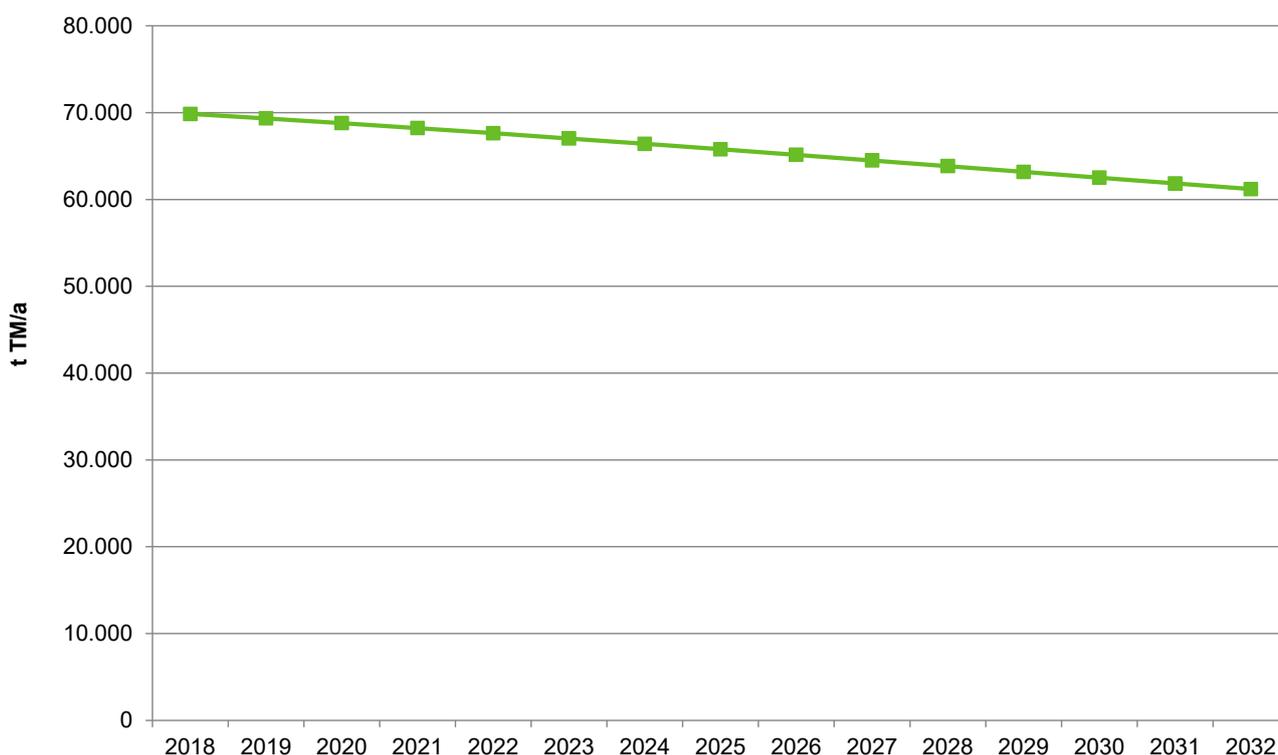


Abbildung 11: Prognose des Klärschlammanfalls für den Freistaat Sachsen für den Zeitraum 2018 bis 2032

Für den betrachteten Zeitraum bis 2032 wird prognostiziert, dass sich die anfallende Klärschlammmenge um ca. 12 % von 69.846 t TM/a (2018) auf 61.200 t TM/a verringert. Dieser Rückgang resultiert zu 45 % aus dem Bevölkerungsrückgang und zu 55 % aus den erwarteten technischen Optimierungen.

5 Phosphorrückgewinnung

5.1 Allgemeines

Das Potenzial von rückgewinnbarem Phosphor aus dem Zulauf von kommunalen Kläranlagen beträgt deutschlandweit etwa 62.000 t (LAGA, 2015). Dies entspricht bis zu 69 % des landwirtschaftlichen Verbrauchs (Destatis, 2018). Wenige Verfahren der Phosphorrückgewinnung können mit der Produktion von Phosphorsäure auch den Grundstoff für andere phosphorverarbeitende Industrien erzeugen (BGR, 2014).

Die Phosphorrückgewinnung ist seit Jahren Gegenstand von Forschung und Entwicklung, von Publikationen und Veranstaltungen. Im Rahmen der TerraTec 2017 wurde durch das LfULG das Forum „Phosphorrückgewinnung aus Abfällen, insbesondere kommunalen Klärschlämmen“ durchgeführt. Zielgruppe der Veranstaltung waren die Betreiber von Kläranlagen und Entsorgungsunternehmen.⁵

Umfangreiches Wissen und Erfahrungen aus der Praxis sowie Veranstaltungshinweise bietet der Deutsche Phosphor-Plattform DPP e.V.⁶ (DPP e.V.) der im Jahr 2015 durch Vertreter aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft gegründet wurde.

5.2 Verfahren der Phosphorrückgewinnung

Phosphorrückgewinnungsverfahren können nach ihren Ansatzpunkten, an denen die Phosphorrückgewinnung in Kläranlagen erfolgt (Rückgewinnung aus Kläranlagenablauf [flüssige Phase], Faul-/Klärschlamm oder Klärschlamm- asche) oder nach Verfahrensarten (z.B. Kristallisations- und Fällungsverfahren), eingeordnet werden.

Kristallisations- und Fällungsverfahren werden meist eingesetzt, um Phosphor aus der flüssigen Phase oder aus dem Faul-/Klärschlamm zurückzugewinnen. Sie zeichnen sich durch Phosphorrückgewinnungsquoten, bezogen auf den Kläranlagenzulauf (KA-Zulauf), von 5 bis 30 % aus (UBA, 2018). Da diese Verfahren in Bereichen des Kläranlagenprozesses eingesetzt werden, die nicht dem Kreislaufwirtschaftsrecht, sondern dem Wasserrecht unterliegen, können sie nur zur Minderung des Phosphorgehaltes im Klärschlamm eingesetzt werden. Die Anforderungen der AbfKlärV an die Phosphorrückgewinnung werden durch ihre alleinige Verwendung nicht erfüllt. Die Regelung für eine Reduzierung des Phosphorgehaltes um mindestens 50 % gemäß Art. 5 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3a Abs. 1 AbfKlärV) gilt ausschließlich für Klärschlämme, welche nach Abschluss der Abwasser- und Schlammbehandlung als Abfall vorliegen. Insofern gilt die 50 %-Regelung nicht für die Kristallisations- und Fällungsverfahren, die vor Abschluss der Abwasser- oder Schlammbehandlung direkt auf der Kläranlage eingesetzt werden. Für diese ist lediglich das Kriterium der Reduktion des P-Gehaltes des abgegebenen Klärschlammes auf unter 20 g/kg TM anwendbar.

⁵ <https://www.wertstoffe.sachsen.de/phosphorruckgewinnung-aus-abfallen-insbesondere-kommunalen-klarschlammen-9715.html>

⁶ www.deutsche-phosphor-plattform.de

Tabelle 11 listet die Voraussetzungen sowie die Vor- und Nachteile der Kristallisations- und Fällungsverfahren auf.

Tabelle 11: Voraussetzungen sowie Vor- und Nachteile der Kristallisations- und Fällungsverfahren (eigene Zusammenstellung)

Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
überwiegend geringes Rückgewinnungspotenzial → nur bei geringen P-Gehalten sinnvoll, z.T. Bio-P-Elimination erforderlich	unabhängig von der Projektrealisierung Dritter, ggf. positive Effekte im Klärprozess (Verringerung von Ablagerungen, Verbesserung der Entwässerung, Senkung der P-, N-Rückbelastung, Senkung des Verbrauchs an Flockungshilfsmitteln)	hoher Platzbedarf, umfassendes technisches Know-how über den Kläranlagenprozess hinaus erforderlich, Investitions- und Betriebsrisiko (Synchronisation der P-Rückgewinnung mit dem Klärprozess), erhöhter personeller Aufwand (Bedienung, Wartung/Instandhaltung, Dispositions- und Planungsleistungen), ggf. Umstellung der Fällung (Bio-P bzw. Fällmittel), keine marktreifen Verfahren verfügbar, Zulassung der Produkte als Düngemittel unsicher und langwierig, fehlende Abfalleigenschaft Rohschlamm → Anforderungen der AbfKlärV an die Phosphorrückgewinnung mit diesen Verfahren nicht zu realisieren, Aufkonzentration von P in Faulung

Eine weitere Verfahrensart der Phosphorrückgewinnung ist der thermochemische Aufschluss, welcher sich auf Faul-/Klärschlämme und Klärschlammaschen bezieht (siehe Tabelle 12). Die Verfahren des thermochemischen Aufschlusses sind in der Regel technisch aufwändig und damit kostenintensiv, bewirken jedoch eine höhere Rückgewinnungsquote von bis zu mehr als 90 %. Von Vorteil ist auch die Zerstörung von organischen Stoffen durch die Verbrennung. Die Pflanzenverfügbarkeit der Rezyklate variiert je nach Verfahren und muss spezifisch betrachtet werden (UBA, 2018).

Tabelle 12 listet die Voraussetzungen sowie die Vor- und Nachteile der Verfahren des thermochemischen Aufschlusses auf.

Tabelle 12: Voraussetzungen sowie Vor- und Nachteile der Monoverbrennung (eigene Zusammenstellung)

Voraussetzungen	Vorteile	Nachteile
Monoverbrennung	auch für Klärschlämme mit hohen P-Gehalten geeignet operativer Kläranlagenbetrieb bleibt unverändert, Erfüllung der Rückgewinnungsaufgaben ist sicher, falls bis 2029/2032 keine technische Lösung großmaßstäblich umgesetzt wird, kann Langzeitlagerung gemäß DepV eine Zwischenlösung darstellen	Monoverbrennung teurer als Mitverbrennung, dadurch insgesamt höhere Kosten im Vergleich zu Kristallisations- und Fällungsverfahren

Vergasungs-, Pyrolyse- oder Karbonisierungs-(HTC-)verfahren beziehen sich ebenfalls auf den Faul-/Klärschlamm (siehe Tabelle 13). Die bekanntesten Verfahren dieser Gruppe erzeugen Rezyklate, welche ebenfalls als Düngemittel genutzt werden sollen. Ob diese Rezyklate zukünftig aus rechtlicher Sicht als Düngemittel verwendet werden dürfen, wird diskutiert, ist zurzeit jedoch nicht abschätzbar (UBA, 2018). Falls eine Verwendung unzulässig ist, müssen weitere Schritte erfolgen, damit der Phosphor im Sinne der AbfKlärV zurückgewonnen werden kann.

Klärschlammaschen können nasschemisch aufgeschlossen werden. Die Rückgewinnungsquote liegt bei diesen Verfahren im Allgemeinen bei mehr als 80 %. Ebenso wie bei den Verfahren des thermochemischen Aufschlusses werden organische Schadstoffe durch die vorangegangene Verbrennung zerstört. Einige Verfahren produzieren Phosphorsäure und unterliegen damit nicht den Anforderungen der DüMV. Falls keine Schwermetallentfrachtung vorgenommen wird, müssen die Produkte bzw. die Aschen den Anforderungen der DüMV entsprechen.

Tabelle 13: Einteilung von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung (eigene Zusammenstellung)

Flüssige Phase	Faul/Klärschlamm	Klärschlammasche
Kristallisations- und Fällungsverfahren (DHV Crystalactor®, NuReSys®, P-RoC, PEARL®)	Thermochemischer Aufschluss (EuPhoRe®, KRN Mephrec®)	Nasschemischer Aufschluss (Ash2®Phos, Ecophos®, INOCRE P-bac, PARFORCE, PASCH, Phos4Life, SeraPlant, TetraPhos®)
	Kristallisations- und Fällungsverfahren (AirPrex®, ExtraPhos®, PhosForce, Stuttgarter Verfahren, MSE Verfahren)	Thermochemischer Aufschluss (AshDec, KRN Mephrec®)
	Vergasungs-, Pyrolyse- oder Karbonisierungs-(HTC-)Verfahren (PYREG, TerraNova® Ultra)	

Für die Verfahren, die sich auf den Ansatzpunkt Klärschlammasche beziehen, wird in diesem Bericht eine Monoverbrennung vorausgesetzt. Eine Phosphorrückgewinnung, die sich auf Mitverbrennungsgaschen bezieht, wäre zwar technisch möglich, jedoch tendenziell unwirtschaftlich. Bisher gibt es jedenfalls kaum Erwägungen zur praktischen Umsetzung, weil die Phosphorkonzentrationen in den Mitverbrennungsgaschen im Vergleich zu den Monoverbrennungsgaschen geringer und die zu behandelnden Mengen größer sind. Das führt zu höheren Kosten bis hin zur Unwirtschaftlichkeit und ist auch aus ökologischen Aspekten wenig vertretbar (Kraus et al., 2019). Ähnlich verhält es sich, wenn ein Gemisch aus phosphorarmen Industrieschlämmen und phosphorreichen Kommunalschlämmen monoverbrannt wird (Kraus et al., 2019). Gemäß § 3a Abs. 2 AbfklärV ist eine Vermischung eines Klärschlammes vor der Phosphorrückgewinnung mit anderen Klärschlämmen nur zulässig, wenn die zugemischten Klärschlämme ebenfalls eine Phosphorkonzentration von 20 g/kg TM oder mehr aufweisen.

Seit Mitte der 1990er Jahre wurden schätzungsweise 50-100 teilweise sehr ähnliche Phosphatrückgewinnungsverfahren entwickelt. Die Zahl der praxisrelevanten Verfahren, welche tatsächlich im Großmaßstab realisiert wurden oder wirtschaftlich eine Chance haben, realisiert zu werden ist bedeutend geringer (Kraus et al., 2019). Die in Tabelle 14 genannten 22 Verfahren wurden ausgewählt, da sie entweder großtechnisch erprobt sind oder ein erkennbares zukünftiges Potenzial für die Phosphorrückgewinnung aufweisen. Im Anhang 1 befindet sich zu jedem dieser Phosphorrückgewinnungsverfahren ein Datenblatt mit ausführlicheren Informationen zu

- Name des Verfahrens und Name der verfahrensentwickelnden Institution,
- Input (Ansatzpunkt),
- Verfahrenstyp,
- Rückgewinnungsrate,
- Beschreibung und schematische Darstellung des Verfahrens,
- gewonnenes Produkt,
- Vor- und Nachteile des Verfahrens,
- Entwicklungsstand sowie
- Bewertung hinsichtlich der aktuellen Einsatzfähigkeit durch den Gutachter.

Für die Erstellung der Datenblätter wurden Informationen aus unterschiedlichen Quellen z. B. der DPP e.V. herangezogen.

Darüber hinaus ist eine Vielzahl anderer Verfahren bekannt, die hier nicht aufgeführt sind, da die Informationsverfügbarkeit sehr begrenzt oder der gegenwärtige Entwicklungsstand (nur Labormaßstab) zu gering ist.

Tabelle 14 zeigt eine Übersicht ausgewählter Phosphorrückgewinnungsverfahren und insbesondere deren Entwicklungsstand. Weitere Einzelheiten zu den Verfahren sind dem Anhang 1 zu entnehmen.

Tabelle 14: Überblick zu ausgewählten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung (eigene Zusammenstellung)

Verfahren	Ansatzpunkt	Entwicklungsstand	Standort	Voraussetzung	Rückgewinnungsrate*	Ergänzende Informationen
DHV Crystalactor®	Flüssige Phase	Großtechnisch	Geestmerambacht (Niederlande)	Bio-P	44%	Einsatz bis 35 g P/kg Klärschlamm-TM
PEARL®	Flüssige Phase	Großtechnisch	Slough (Vereinigtes Königreich)	Bio-P	33-50 %	Einsatz bis 29 g P/kg Klärschlamm-TM
NuReSys®	Flüssige Phase	Großtechnisch	mehrere Standorte in Belgien	Bio-P	29 %	Einsatz bis 28 g P/kg Klärschlamm-TM
PhosForce	Flüssige Phase	Pilotanlage	Schönebeck (Elbe)	-	>50 %	
P-RoC	Flüssige Phase	Pilotanlage	Neuburg	Bio-P	33 %	Einsatz bis 29 g P/kg Klärschlamm-TM
EuPhoRe®	Faul-/ Klärschlamm	Großtechnisch	2 Standorte in der Schweiz Planung: Offenbach und Mannheim	-	98 %	
PYREG	Faul-/ Klärschlamm	Großtechnisch	Homburg, Linz-Unkel, Redwood (USA)	-	>90 %	Düngerechtliche Zulassung ungeklärt
AirPrex®	Faul-/ Klärschlamm	Großtechnisch	Mönchengladbach-Neuwerk, Waßmannsdorf (Berlin), Uelzen, Salzgitter, Steinhof (Braunschweig)	Bio-P	12-24 %	Einsatz bis 25 g P/kg Klärschlamm-TM
TerraNova® Ultra	Faul-/ Klärschlamm	Pilotanlage	Jining (China) Düsseldorf	-	60-80 %	
Stuttgarter Verfahren und MSE-Verfahren	Faul-/ Klärschlamm	Pilotanlage	Offenburg-Griesheim, Stuttgart	keine	>50 %	
ExtraPhos®	Faul-/ Klärschlamm	Pilotanlage	Mainz-Mombach, Itzehoe	-	50 %	keine Schwermetallentfrachtung: nur für DüMV-konformen Klärschlamm geeignet oder weitere Aufbereitung
KRN Mephrec®	Faul-/ Klärschlamm, Klärschlamm-asche	Pilotanlage	Nürnberg	-	67 %	erfolgreiche Umsetzung einer modifizierten Anlage bleibt abzuwarten
Substitution in der Düngemittelindustrie	Klärschlamm-asche	Großtechnisch	Ludwigshafen, Amsterdam (Niederlande)	Mono-verbrennung	100 %	keine Schwermetallentfrachtung: Produkt muss den Vorgaben der DüMV entsprechen
SeraPlant	Klärschlamm-asche	Großtechnisch	Tangermünde	Mono-verbrennung	100 %	keine Schwermetallentfrachtung: Produkt muss den Vorgaben der DüMV entsprechen
Ecophos®	Klärschlamm-asche	Großtechnisch	mehrere Standorte (nicht in Deutschland)	Mono-verbrennung	75-90 %	Produkt (Phosphorsäure) unterliegt nicht den Vorgaben der DüMV
Phos4Life	Klärschlamm-asche	Pilotanlage	Madrid (Spanien)	Mono-verbrennung	>95 %	Produkt (Phosphorsäure) unterliegt nicht den Vorgaben der DüMV

Ash Dec®	Klärschlamm- asche	Pilotanlage	2008 bis 2010 Leoben (Österreich)	Mono- verbrennung	94 %	
Ash2®Phos	Klärschlamm- asche	Pilotanlage	Helsingborg (Schweden)	Mono- verbrennung	90-95 %	Produkt (Phosphorsäure) unterliegt nicht den Vorgaben der DüMV
INOCRE P-bac	Klärschlamm- asche	Pilotanlage	Großhelfersdorf	Mono- verbrennung	80 %	
TetraPhos®	Klärschlamm- asche	Pilotanlage	Hamburg	Mono- verbrennung	86 %	Produkt (Phosphorsäure) unterliegt nicht den Vorgaben der DüMV
PARFORCE	Klärschlamm- asche	Technikum	Freiberg	Mono- verbrennung	>80 %	Produkt (Phosphorsäure) unterliegt nicht den Vorgaben der DüMV
PASCH	Klärschlamm- asche	Technikum	Aachen	Mono- verbrennung	78-89 %	

Im Freistaat Sachsen werden ebenfalls verschiedene Verfahren zur Phosphorrückgewinnung entwickelt, welche nachfolgend dargestellt werden.

PARFORCE

Hierbei handelt es sich um eine Verfahrensentwicklung der PARFORCE Engineering & Consulting GmbH. Das Unternehmen ist eine Ausgründung der TU Freiberg und betreibt seit 2018 eine Demonstrationsanlage in Freiberg. Zentraler Baustein ist der PARFORCE-Core-Prozess. Durch die Technologie kann Phosphorsäure aus unterschiedlichen Materialien (u. a. Klärschlamm- asche, Magnesiumammoniumphosphat [MAP]) zurückgewonnen werden. Im Rahmen eines nasschemischen Verfahrens erfolgt der Aufschluss der phosphathaltigen Einsatzstoffe mittels Salz- oder Salpetersäure. Nach einer Filtration wird die gebildete Phosphorsäure durch einen Membranprozess abgetrennt und anschließend aufkonzentriert. Eine großtechnische Umsetzung erfolgt gegenwärtig nicht. Das Verfahren ist in Tabelle 14 mit aufgeführt und wird durch ein Datenblatt im Anhang 1 näher beschrieben.

Klärschlamm-Pyrolyse Niederfrohna

Der Zweckverband Frohnbach errichtete im Juni 2018 am Standort der zentralen Kläranlage Niederfrohna (40.000 EW) eine Pyrolyseanlage für die Verwertung von Klärschlamm. Das Projekt wird durch den Freistaat Sachsen finanziell gefördert. Ausgangspunkt für das Projekt war die fehlende Möglichkeit der bodenbezogenen Verwertung für die anfallenden Klärschlämme, bei denen insbesondere die Cadmium-Grenzwerte der DüMV überschritten werden und auch die Quecksilberwerte in einem kritischen Bereich liegen.

Zur Errichtung kommen eine Trocknungs- (maschinelle Entwässerung und Konvektionstrocknung) und eine Pyrolyseanlage für eine Durchsatzleistung von 1.450 t/a OS. Die entstehende Prozesswärme soll für die Trocknung verwendet werden. Ggf. kann darüber hinaus mit Hilfe eines Stirling-Motor-BHKW elektrische Energie erzeugt werden. Im Ergebnis sollen 170 t/a Pyrolysekoks entstehen. Geplant ist die dezentrale landwirtschaftliche Verwertung des Pyrolysekokes, wofür allerdings die düngemittelrechtliche Zulässigkeit des Materials Voraussetzung ist. Eigene Versuchsergebnisse belegen die Möglichkeit der düngemittelrechtlichen Zulässigkeit (ZV Frohnbach, 2017), allerdings ist Pyrolysekoks derzeit nicht in Anhang 2 DüMV gelistet. Sollte keine Aufnahme von Pyrolysekoks in den Anhang 2 der DüMV erfolgen, ist das Verfahren nicht zur Phosphorrückgewinnung mit dem Ziel der Inverkehrbringung des Pyrolyseproduktes als Düngemittel geeignet.

Pontes Pabuli

Die pontes pabuli GmbH aus Leipzig entwickelt ein Verfahren, bei dem die Phosphate in Klärschlamm- aschen mittels Säureaufschluss verfügbar gemacht und durch ein Granulationsverfahren zu Düngemitteln weiterverarbeitet werden. Optional können Schwermetalle abgeschieden werden (Leidolph, 2019). Die Entwicklung des Verfahrens wurde unter dem Titel „Entwicklung eines effizienten P-Recyclingverfahrens mit Schwermetallabtrennung“ mit einer Laufzeit 03/2019 bis 03/2020 durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert (DBU, 2019). In Kooperation mit der EEW Energy from Waste GmbH soll das Verfahren zur Phosphorrückgewinnung in der Klärschlammmonoverbrennungsanlage Stapelfeld (Schleswig-Holstein), die sich derzeit in der Genehmigungsphase befindet, eingesetzt werden (EEW, 2019).

Akkumulation und schadstoffarme Verfügbarmachung von Bio-P aus Klärschlamm

Das Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH UFZ in Leipzig hat in Kooperation mit der CENTEC Gesellschaft für Labor- und Prozessmesstechnik mbH im Rahmen des Forschungsvorhabens „Akkumulation und schadstoffarme Verfügbarmachung von Bio-P aus Klärschlamm“ ein Verfahren zur schadstoffarmen Düngemittelproduktion mittels biologischer Phosphateliminierung aus Klärschlamm entwickelt. Das Projekt wurde durch die DBU gefördert und die Ergebnisse 2017 veröffentlicht (Müller u. Günther, 2017). In einem ersten Schritt wird der im Überschussschlamm der Kläranlage als Polyphosphat gebundene Phosphor ohne Energieeintrag und pH-Wert-Änderung innerhalb von 48 Stunden rückgelöst. Im Mittel werden Rücklösequoten von 34 % erreicht. Anschließend wird der gelöste Phosphor unter aeroben Bedingungen innerhalb von zwei Stunden durch die eingesetzte Hefe *Saccharomyces cerevisiae* (Bierhefe aus Endführungen von Brauereien) fixiert. Die Versuche haben gezeigt, dass sich die phosphorereicherten Hefen gut als schadstofffreier, biologischer Phosphatdünger mit hoher Pflanzenverfügbarkeit eignen. Zudem werden Resthefen der Bierherstellung sinnvoll verwertet (Müller u. Günther, 2017). Derzeit wird das Verfahren in der Kläranlage Eilenburg des Abwasserzweckverbandes Mittlere Mulde erprobt (EUWID Wasser und Abwasser, 2018a). Auch dieses Projekt wird durch die DBU im Zeitraum 02/2018 bis 01/2021 gefördert (DBU, 2018). Das LfULG prüft am Standort Nossen im Gefäßversuch die Wirkung des in der Hefe gebundenen Phosphors auf Wachstum und P-Aufnahme bei Mais.

Im Rahmen der zweistufigen BMBF-Fördermaßnahme Regionales Phosphor-Recycling (RePhoR) wurden zwei sächsische Projektanträge in der ersten Förderphase (Konzeptphase) gefördert. Diese beiden Projekte sind folgende (Löwe 2019):

ZemPhoRe

Ziel des Projektes war die Entwicklung eines ganzheitlichen Konzeptes für die stoffliche und energetische Verwertung von Klärschlämmen im Zementwerk nach vorheriger Phosphorrückgewinnung (Ausführende Stelle: Technische Universität Bergakademie Freiberg – Fakultät für Chemie und Physik - Institut für Technische Chemie). Das Projekt wird in der zweiten Phase (Umsetzungsphase) nicht gefördert (Bartelt, 2020).

DreiSATS

Ziel der Konzeptphase von DreiSATS ist die Konzepterstellung zur regionalen Verwertung von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen im mitteldeutschen Dreiländereck Sachsen-Anhalt, Thüringen und Sachsen sowie die Untersuchung zentraler und dezentraler Konzepte für die Kombination von Staubfeuerung und Säureaufschlussgranulierung (Ausführende Stelle: Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH). Nach Auskunft des BMBF (Bartelt, 2020) wurde das Vorhaben für die zweite Förderphase (Umsetzungsphase) bewilligt. Der Projektbeginn war der 01.07.2020.

5.3 Bewertung der Sekundärphosphate

5.3.1 Qualität der Sekundärphosphate

Die Qualität der Sekundärphosphate kann an Hand verschiedener Eigenschaften bewertet werden. Im Nachfolgenden wird dazu auf

- die Düngewirkung,
- den Schwermetallgehalt,
- die organische Verunreinigung durch Wirkstoffe aus Arzneimitteln sowie
- Verunreinigungen mit organischen Schadstoffen

eingegangen.

Bei den nachfolgenden Betrachtungen ist zu beachten, dass die genaue Stoffzusammensetzung der Sekundärphosphate, zu denen die in den Datenblättern aufgelisteten Phosphorprodukte (s. Anhang 1) gehören, überwiegend nicht bekannt ist (Montag et al., 2015). Das gilt auch für das Ausgangsmaterial der Verfahren (Montag et al., 2015). Im

Allgemein ist die Qualität der Sekundärphosphate vom Ausgangsmaterial abhängig. So sind z. B. schwer lösliche und damit kaum pflanzenverfügbare Eisen- und Aluminiumphosphate aus der chemischen P-Elimination, die im Klärschlamm enthalten sind und nicht wieder in Lösung gebracht werden, im späteren Sekundärphosphat enthalten. Zusätzlich können Veränderungen der Verfahren (z.B. verfahrensinterne Fällungsmittel, Aufschlussmethode oder Temperaturen) dazu führen, dass sich die Produkteigenschaften über die Jahre verändern (Montag et al., 2015).

Düngewirkung

In Montag et al. (2015) erfolgt eine ausführliche Literaturrecherche, zu der anschließend eine tendenzielle Einordnung der einzelnen Sekundärphosphate im Vergleich zum vollaufgeschlossenen Mineraldünger (100 % Düngewirkung) in vier Abstufungen erfolgt. Ausgehend von dieser Einstufung wurden die Phosphorprodukte der betrachteten Verfahren eingeteilt (siehe Tabelle 15).

Die Verfahren, die an der flüssigen Phase ansetzen, zielen hauptsächlich auf die Gewinnung von Magnesium-Ammonium-Phosphat (Struvit) ab, welches eine sehr gute Düngewirkung hat. Die Phosphorprodukte der Verfahren, die am Faul-/Klärschlamm ansetzen, besitzen eine geringe bis sehr gute Düngewirkung. Die Phosphorprodukte der Verfahren zur Rückgewinnung aus Klärschlammmonoverbrennungsasche sind kaum düngewirksam, wobei hier viele Verfahren Phosphorsäure produzieren und somit nicht als düngemittelerzeugend bewertet werden können (Ash2@Phos, Ecophos®, PARFORCE, Phos4Life, TetraPhos®). Für einige Verfahren ist das Phosphorprodukt nicht näher definiert und kann deswegen ebenfalls nicht bewertet werden. Dazu gehören EuPhoRe® (phosphathaltige Asche), KRN-Mephrec (u.a. P-Schlacke), PYREG (phosphorhaltiges Karbonisat) und SeraPlant (aufgeschlossene phosphathaltige Klärschlammasche).

Tabelle 15: Zuordnung von Phosphorprodukten zu Düngewirkungsstufen (verändert nach Montag et al. (2015)⁷)

Stufe	Düngewirkung im Vergleich zum vollaufgeschlossenen Mineraldünger	Agronomische Effizienz	Beispiele
I	100-75 %	sehr gut	Magnesium-Ammonium-Phosphat (Struvit), Mono-Ammonium-Phosphat
II	75-50 %	gut	Magnesium-Phosphate, Calcium-Siliko-Phosphate, Kalium-Phosphate
III	50-25 %	gering	Calcium-Phosphate
IV	25-0 %	kaum	Aluminium-Phosphate, Eisen-Phosphate

Sofern Phosphorprodukte als Düngemittel eingesetzt werden sollen, müssen sie einem Düngemitteltyp des Anhangs 1 der DüMV entsprechen und die sonstigen Vorgaben der DüMV einhalten.

Schwermetalle

Der Gehalt an Schwermetallen ist eine Eigenschaft, an Hand derer die Verfahrensprodukte der Phosphorrückgewinnung zu bewerten sind. Ihre Schwermetallgehalte hängen grundsätzlich von den Schwermetallgehalten der Ausgangsmaterialien ab (Pinnekamp et al., 2011). Im Allgemeinen findet durch die Anwendung von Phosphorrückgewinnungsverfahren eine Abreicherung der Schwermetalle, ausgenommen Arsen, statt (Pinnekamp et al., 2011). Allerdings entfrachten nicht alle Phosphorrückgewinnungsverfahren Schwermetalle (z.B. ExtraPhos®, SeraPlant). Pinnekamp et al. (2011) analysierten Schwermetallgehalte (Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Arsen, Cadmium) von 16 Verfahrensprodukten (u.a. P-RoC, Stuttgarter Verfahren, PASCH, Ash Dec®) und stellten vier Grenzwertüberschreitungen nach DüMV fest (u.a. bei Ash Dec® für Nickel). In KRN-Mephrec (2018) sind weitere Schwermetall-

⁷ Neben den aus Montag et al. (2015) entnommenen Verfahrensprodukten sind zusätzliche Produkte aufgelistet und mit * gekennzeichnet.

untersuchungen (Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Arsen, Cadmium, Quecksilber, Thallium, Blei) für Verfahrensprodukte von AirPrex®, Ash Dec®, KRN Mephrec®, PASCH, P-Roc und dem Stuttgarter Verfahren beschrieben. Bezogen auf die Mittelwerte der Untersuchungen wurde der einzige Grenzwert nach DüMV bei Ash Dec® wiederum für Nickel überschritten. In Kraus und Seis (2015) wurden ebenfalls Schwermetallgehalte (Chrom, Nickel, Kupfer, Zink, Arsen, Cadmium, Quecksilber, Blei) von Verfahrensprodukten (u.a. PEARL®, AirPrex®, Stuttgarter Verfahren, Ash Dec®, KRN Mephrec) recherchiert, aus denen keine Grenzwertüberschreitung hervorgeht.

Organische Verunreinigungen durch Wirkstoffe aus Arzneimitteln

Untersuchungen über Schadstoffe in Produkten der Phosphorrückgewinnung beziehen sich hauptsächlich auf Schwermetalle, da für diese Grenzwerte in der DüMV enthalten sind. Daneben sind jedoch weitere Stoffe zu beachten wie solche, die aus Arzneimitteln stammen. Speziell bei Produkten der Phosphorrückgewinnung ist der Gehalt an Schadstoffen aus Arzneimitteln ein wichtiges Charakterisierungsmerkmal. Wirkstoffe in vom Menschen eingenommenen Arzneimitteln werden zumeist unverändert ausgeschieden und können über den Abwasserpfad auch in Produkte der Phosphorrückgewinnung gelangen (Stenzel et al., 2019). Organische Verunreinigungen durch Wirkstoffe aus Arzneimitteln sind hauptsächlich bei Verfahren zu erwarten, in denen das Material nicht thermisch behandelt wird. Durch eine Behandlung mit Temperaturen von mehr als 500 °C werden Wirkstoffe aus Arzneimitteln zuverlässig zerstört. Die elf durch Stenzel et al. (2019) gemessenen Wirkstoffe aus Arzneimitteln⁸ für Produkte solcher Verfahren lagen unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Für die im Anhang dieses Berichtes dargestellten Phosphorrückgewinnungsverfahren ergeben sich dadurch potenzielle Verunreinigungen bei den Kristallisations- und Fällungsverfahren sowie bei den Pyrolyse- (teilweise) und Karbonisierungs-(HTC-)Verfahren (TerraNova® Ultra). Eine mögliche Maßnahme, um den Gehalt an Wirkstoffen aus Arzneimitteln bei Produkten der Kristallisations- und Fällungsverfahren zu verringern, ist eine verbesserte Fest-Flüssig-Trennung, da Wirkstoffe aus Arzneimitteln im Allgemeinen an Feststoffen sorbieren (Stenzel et al., 2019). Das gilt ebenfalls für das durch Stenzel et al. (2019) nicht betrachtete TerraNova®-Ultra-Verfahren, da innerhalb des Verfahrens nach der hydrothermalen Karbonisierung ebenfalls eine Fest-Flüssig-Trennung stattfindet.

Verunreinigung mit organischen Schadstoffen

Die Verunreinigung von Phosphorprodukten aus der Rückgewinnung mit organischen Schadstoffen ist nur in geringem Umfang Gegenstand von Untersuchungen gewesen.

Eine Untersuchung von Recyklaten von fünf verschiedenen Verfahren zeigte, dass alle Proben sowohl PAK als auch PCDD/F und dl-PCB enthalten (Theilen et al., 2019). Zwei der Verfahren nutzen Klärschlamm, drei Klärschlammmasche als Ausgangsmaterial. Die Werte der chlorierten Schadstoffe lagen dabei weit unterhalb des Grenzwerts der AbfklärV. In der Studie wurden 16 PAKs als Summe gemessen, weshalb die Ergebnisse nicht mit dem Grenzwert für Benzo(a)pyren verglichen werden können. In allen Proben lag der Summenwert deutlich über dem Grenzwert.

In der Pyrolyse und der hydrothermalen Karbonisierung von Klärschlamm kann es zu einer Anreicherung von PAK kommen. Hilber et al. (2012) untersuchten u.a. den Gehalt von 16 PAKs in den Karbonisaten. Dabei wurden vor allem Naphtalin und Phenanthren gefunden. Insgesamt lag der Gehalt an PAK in Summe leicht über dem Grenzwert für Benzo(a)pyren.

Sowohl Liu et al. (2018) als auch Peng et al. (2017) beobachteten eine Anreicherung von PAK im Karbonisat gegenüber dem Klärschlamm während der hydrothermalen Karbonisierung (HTC). Li et al. (2017) untersuchten auch den Gehalt an PAKs in der Flüssigphase. Dieser lag zwischen 2,76-2,97 µg/ml in einen TerraNova® Ultra ähnlichem Temperaturbereich. Brookman et al. (2018) untersuchten die Entwicklung von chlorierten organischen Schadstoffen in Karbonisaten bei unterschiedlichen Temperaturen. Bei 200°C kam es zu einer Anreicherung von PCDD, während der Gehalt an PCDF und PCB im Vergleich zum Klärschlamm sank. Gleichzeitig wurde für PCDD und PCB eine deutliche Erhöhung der Toxizität beobachtet. Insgesamt wiesen die Karbonisate eine höhere Toxizität auf als der verwendete

⁸ Ciprofloxacin, Levofloxacin, Clarithromycin, Carbamazepin, 17- α -Ethinylestradiol, Diclofenac, Cefuroxim, Sulfamethoxazol, 17- β -Estradiol, Metoprolol und Bezafibrat

Klärschlamm. Da im TerraNova®-Ultra-Verfahren das Phosphat aus der Flüssigphase zurückgewonnen wird, ist unklar inwieweit dieses von der Anreicherung von PAK oder chlorierten organischen Schadstoffen betroffen ist. Eine direkte Untersuchung der Produkte auf diese Schadstoffe hat bisher nicht stattgefunden.

5.3.2 Ökonomische Betrachtungen zur Phosphorrückgewinnung

Für eine umfassende ökonomische Betrachtung der Phosphorrückgewinnung sind die Kosten und Erlöse zu berücksichtigen. Zu den Kosten gehören insbesondere Kapital-, Energie-, Sach- und Personalkosten.

Die Kosten für die Phosphorrückgewinnung hängen sehr stark vom betrachteten Einzelfall ab und lassen sich kaum pauschalisiert bewerten. Es können jedoch verfahrensbedingte Synergieeffekte eintreten, wodurch z.B. Betriebsmittel an anderer Stelle eingespart werden (Kraus et al., 2019). Vor allem Kläranlagen, die nach dem Bio-P-Prinzip zur Phosphorelimination arbeiten, haben mit phosphathaltigen Inkrustationen (hauptsächlich MAP) zu kämpfen. Die Reduzierung von Inkrustationen in den Rohr- und Reaktorsystemen können zu Senkungen der Betriebskosten der Abwasserbehandlung führen. Durch eine thermische Klärschlammbehandlung (Trocknung) kann die Menge des zu entsorgenden Klärschlammes reduziert werden.

Durch den Verkauf der Phosphorprodukte können Erlöse generiert werden, welche kostenmindernd wirken. Bei der Werthaltigkeit der erzeugten Produkte, bezogen auf 1 t Klärschlammmonoverbrennungssasche mit 9 % P, ergeben sich jedoch erhebliche Unterschiede. Aus einer Tonne Asche lassen sich folgende Produktmengen erzeugen (Eschment, 2020):

- ~ 1,50 t Triplesuperphosphat mit einem aktuellen Marktwert von ungefähr 300 €/t Asche (30 €/t entwässerter KS),
- ~ 0,33 t Phosphorsäure (H₃PO₄) (75%ig) mit einem aktuellen Marktwert von ungefähr 220 €/t Asche (22 €/t entwässerter KS),
- ~ 0,34 t Calciumhydrogenphosphat (Ca(H₂PO₄)₂) mit einem aktuellen Marktwert von ungefähr 60 €/t Asche (6 €/t entwässerter KS).

Zu beachten ist, dass die Preise der genannten Erzeugnisse unterschiedlich volatil sind. Der Preis für Phosphorsäure ist aufgrund der vielfältigen Verwendungsmöglichkeiten vergleichsweise stabil. Dünger (Triplesuperphosphat) und Grundstoffe für die Düngemittelherstellung (Calciumhydrogenphosphat, Preisentwicklung entsprechend Rohphosphat) unterliegen demgegenüber erheblichen Preisschwankungen. Im Hinblick auf die Herstellung sowie Zulassungs- und Vermarktungsfähigkeit der Erzeugnisse sind die Risiken für die Düngerherstellung im Zuge der Phosphorrückgewinnung erheblich höher als für nass-chemische Verfahren, bei denen Grundstoffe hergestellt werden.

Da bislang nur wenige Verfahren im großtechnischen Maßstab umgesetzt sind, fehlen entsprechende Angaben zu den Betriebskosten großtechnischer Anlagen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieses Berichtes auf Literaturdaten (z.B. Egle et al., 2014) zurückgegriffen, die zumindest eine orientierende Aussage über die anfallenden Kosten erlauben. Nachfolgend werden die Kosten unterteilt nach den Ansatzpunkten der Verfahren (flüssige Phase, Faul-/Klärschlamm, Klärschlamm-asche) verglichen. Es wird ein produkt- (Abbildung 12) und ein einwohnerspezifischer Bezug (Abbildung 13) gewählt. Der produktspezifische Bezug stellt die Kosten in Euro dar, welche für die Rückgewinnung von 1 kg Phosphor erforderlich sind (€/kg P). Der einwohnerspezifische Bezug beschreibt die Kosten, die für die Phosphorrückgewinnung aus der durch einen Einwohner erzeugten Klärschlammmenge pro Jahr aufzuwenden sind. Neben einigen Verfahren, die in diesem Bericht näher erläutert werden (siehe Anhang 1), wurden in der zitierten Literatur auch Daten von anderen Verfahren verwendet.

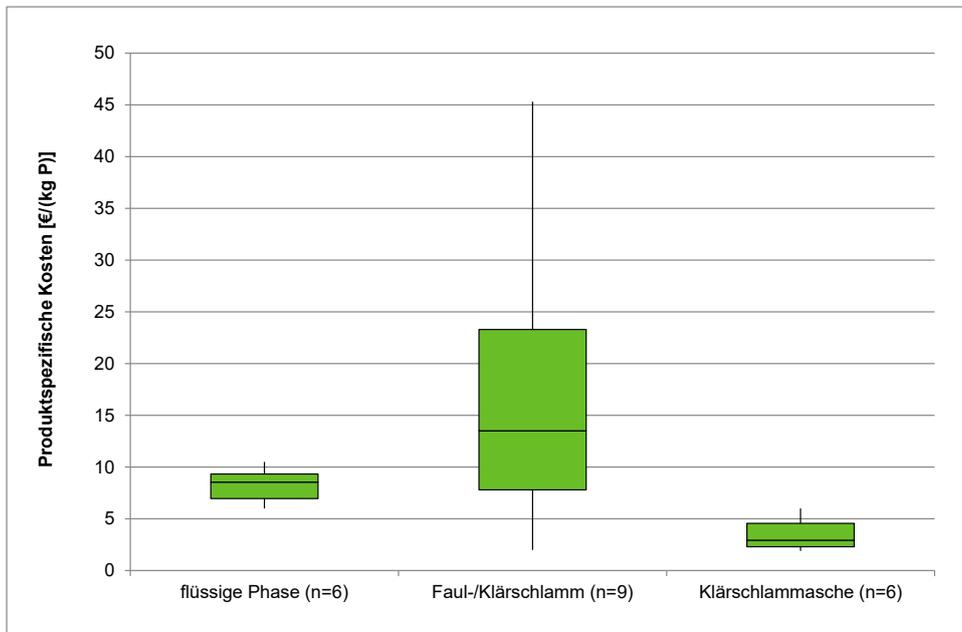


Abbildung 12: Produktspezifische Kosten von Verfahren, unterteilt nach Ansatzpunkten (flüssige Phase, Faul-Klärschlamm, Klärschlammasche); (flüssige Phase: Egle et al. (2014); Faul-Klärschlamm: Egle et al. (2014), Beier et al. (2016); Klärschlammasche: Egle et al. (2014), Steinmetz et al. (2014), Montag et al. (2015))

Die produktspezifischen Kosten von Verfahren zur Rückgewinnung aus der Asche (Median: 2,94 €/kg P) sind demnach am geringsten (Abbildung 12). Voraussetzung für diese Verfahren ist allerdings die Monoverbrennung, deren Kosten sich zwischen 70 und 120 €/t (bei 25 % TM, Stand: 20.05.2019) bewegen (EuWiD, 2019b).

Die produktspezifischen Kosten von Verfahren, die an der flüssigen Phase ansetzen, sind höher, der Medianwert beträgt hier 8,55 €/kg P. Die produktspezifischen Kosten für Verfahren, die am Faul-/Klärschlamm ansetzen, weisen im Vergleich zu den beiden anderen Verfahrensarten eine große Spannweite auf, wobei der Median mit 13,50 €/kg P sogar deutlich über den Maxima der beiden anderen Verfahrensarten liegt. Es ist aber mit Blick auf die Gesamtwirtschaftlichkeit zu beachten, dass zu den Verfahrenskosten für die Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm noch die Kosten für die Mitverbrennung hinzukommen, die langfristig auf demselben Niveau wie die Kosten für die Monoverbrennung liegen dürften. Darüber hinaus dürfte der dezentrale Ansatz einer Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm einzelner Kläranlagen insgesamt wirtschaftlich nachteiliger sein als eine zentrale Lösung mit Monoverbrennung und direkt gekoppelter P-Recyclinganlage aus den Monoaschen.

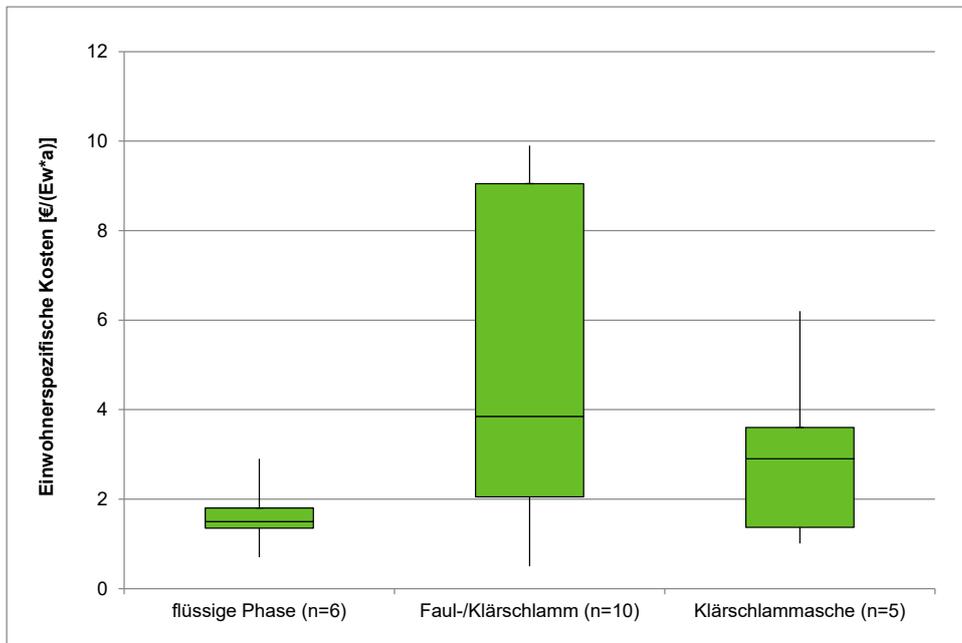


Abbildung 13: Einwohnerspezifische Kosten von Verfahren, unterteilt nach Ansatzpunkten (flüssige Phase: Egle et al. (2014); Faul-Klärschlamm: Egle et al. (2014), Beier et al. (2016), Turek und Bouché (2018); Klärschlammasche: Egle et al. (2014), Montag et al. (2016)).

Im Vergleich der Verfahrensarten bezüglich der einwohnerspezifischen Kosten sind die Kosten der Verfahren, die an der flüssigen Phase ansetzen [Median: 1,50 €/EW*a], überwiegend geringer als die der anderen Verfahrensarten (Median Klärschlammasche: 2,90 €/EW*a; Median Faul-/Klärschlamm: 3,85 €/EW*a) [s. Abbildung 13]). Die Verfahren, die am Faul-/Klärschlamm ansetzen, weisen die größte Spannweite auf und schließen die Minima und Maxima der beiden anderen Verfahrensarten ein.

Die einwohnerspezifischen Kosten für die ausgewählten Phosphorrückgewinnungsverfahren betragen 0,35 bis 7 % der bisherigen jährlichen einwohnerspezifischen Ausgaben für die Abwasserbeseitigung (2013: 142,55 €/EW*a; DWA, 2014). Unter der Annahme, dass sich sehr teure Verfahren nicht durchsetzen werden, kann davon ausgegangen werden, dass für die Phosphorrückgewinnungsverfahren zusätzliche Kosten von 80 bis 160 €/t TM Klärschlamm anfallen werden. Schätzungen des UBA (2018) gehen davon aus, dass sich die Abwasserentgelte durch die Phosphorrückgewinnung (einschließlich Klärschlammmonoverbrennung) je nach den regionalen Bedingungen um 3 bis 11 €/EW*a erhöhen könnten, was mit den dargestellten Kosten korrespondiert.

Kosten, die für die Verfahren der Rückgewinnung zusätzlich anfallen, können auf die Abwassergebühren umgelegt werden [DPP e.V]. Auch nach dem Sächsischen Kommunalabgabengesetz (SächsKAG) können die Kosten für Maßnahmen zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche in die Kalkulation der Abwassergebühren einbezogen werden (Zitat aus dem Erlass des SMI, 2018):

„Dies ist nach hiesiger Rechtsauffassung zu bejahen, soweit die Phosphorrückgewinnung den Trägern der Abwasserentsorgung (je nach Ausbaugröße der Abwasserbehandlungsanlage) verpflichtend vorgeschrieben ist. Schon bisher galt, dass den Abwasserentsorger (= Aufgabenträger) als Klärschlammherzeuger und damit als Abfallbesitzer abfallrechtliche Pflichten treffen. Die damit verbundenen Kosten sind als betriebsbedingte und notwendige Kosten im Sinne von § 11 Abs. 1 SächsKAG gebührenfähig, unabhängig davon, ob der Klärschlamm vom Aufgabenträger selbst auf der Abwasserbehandlungsanlage behandelt wird oder an einen Dritten zur Behandlung abgegeben wird; im zweiten Fall ist das Fremdleistungsentgelt in die Kalkulation einzustellen. Hieran ändert sich durch die neue Klärschlammverordnung nichts, da diese lediglich einen Paradigmenwechsel hinsichtlich der Art der Verwertung des phosphorhaltigen Klärschlammes vorsieht.“

5.3.3 Ökobilanzielle Betrachtung der Phosphorrückgewinnung

In Kraus et al. (2019) wurde eine ökobilanzielle Bewertung von elf ausgewählten Phosphorrückgewinnungsverfahren im Vergleich zur konventionellen Düngemittelproduktion vorgenommen. Die Autoren weisen für die Verfahren, die in der flüssigen Phase und im Faul-/Klärschlamm ansetzen, eine Netto-Gutschrift, d.h. eine Verringerung des Energieaufwands, aus. Eine Ausnahme bildet das Stuttgarter Verfahren, in dem durch die hohe Chemikaliengabe zwar eine hohe Rückgewinnungsquote erreicht wird, das jedoch im Vergleich zur konventionellen Düngemittelproduktion einen doppelt so hohen Energieaufwand hat. Die von Kraus et al. (2019) betrachteten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus der Verbrennungssasche (EcoPhos, TetraPhos, AshDec) beinhalten einen ca. 80 % höheren Energieaufwand als die konventionelle Düngemittelproduktion. Der höhere Energieaufwand entsteht hauptsächlich durch die Monoverbrennung. Fehrenbach und Reinhardt (2011) kamen bei ihren Untersuchungen (u.a. P-RoC, PASCH) zu ähnlichen Schlussfolgerungen. Im Allgemeinen stellten sie fest, dass Verfahren zur Rückgewinnung aus der Asche aufgrund der Monoverbrennung nachteiligere Umweltwirkungen verursachen als Verfahren, die am Faul-/Klärschlamm oder an der flüssigen Phase ansetzen.

Im Vergleich zur direkten landwirtschaftlichen Ausbringung des Klärschlammes bieten die von Fehrenbach und Reinhardt (2011) untersuchten Verfahrensprodukte Vorteile hinsichtlich der Schadstoffeinträge in Böden und der Versauerung. Hinsichtlich der anderen bewerteten Wirkungskategorien gibt es bis auf wenige Ausnahmen keine zusätzlichen Umweltbelastungen.

Stenzel et al. (2019) konnten zudem nachweisen, dass alle Prozessketten und Phosphorrückgewinnungsverfahren signifikante Reduzierungen der Schadstoffbelastung aus Arzneimitteln erreichen. Die größte Reduzierung erfolgt durch die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammverbrennungssasche, da bei der thermischen Behandlung des Klärschlammes die Schadstoffe zerstört werden. Der Eintrag von Schadstoffen aus Arzneimitteln in Böden und Gewässer verringert sich somit durch die Verwendung von Phosphorzyklen im Vergleich zur direkten Ausbringung von Klärschlamm bzw. Klärschlammkomposten.

5.3.4 Zusammenfassende Bewertung

- Die Düngewirkung von Sekundärphosphaten nimmt von der Rückgewinnung aus der flüssigen Phase über die Rückgewinnung aus Klärschlämmen bis hin zur Rückgewinnung aus Klärschlammmasche ab.
- Nicht alle Rückgewinnungsverfahren verfügen über eine Schwermetallentfrachtung. Bei hohen Gehalten an Schwermetallen ist darauf zu achten, dass eine Schwermetallentfrachtung möglich ist, um die Grenzwerte der DüMV einhalten zu können. Verfahren ohne Schwermetallentfrachtung sind demzufolge für Klärschlämme mit hohen Schwermetallgehalten ungeeignet.
- Bei nicht-thermischen Verfahren besteht die Gefahr von Schadstoffen im Endprodukt. Eine verbesserte Fest-Flüssig-Trennung kann z.B. Arzneimittelgehalte verringern. Eine zuverlässige Zerstörung dieser Schadstoffe lässt sich nur durch thermische Verfahren erreichen.
- Die Kosten der Verfahren, die an der flüssigen Phase ansetzen, sind deutlich geringer als die Kosten der Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm. Insofern die Kläranlage über die entsprechenden Voraussetzungen (z. B. Bio-P-Elimination, P-Gehalte im Klärschlamm nur leicht über 20 g/kg TM) verfügt, sollte geprüft werden, ob sich die Anforderungen der AbfKlärV nicht bereits durch eine Phosphorrückgewinnung aus der flüssigen Phase erfüllen lassen. Dies kann aufgrund der vergleichsweise niedrigen P-Gehalte der Klärschlämme von Kläranlagen der GK2 und 3 für kleinere Kläranlagen von Bedeutung sein (siehe Kapitel 3.3.2). Klärschlämme, die auf diesem Wege eine Abreicherung auf ≤ 20 g P/kg TM durchlaufen haben, können auf dem Wege der Mitverbrennung entsorgt werden. Zur zeitlichen Begrenzung der Mitverbrennung in Braunkohlekraftwerken siehe Kapitel 6.2.2.

- Im Vergleich zur konventionellen Mineraldüngerproduktion ist die Phosphorrückgewinnung aus der flüssigen Phase oder dem Faul-/Klärschlamm ökonomisch besser zu bewerten. Die Phosphorrückgewinnung aus der Klärschlammasche schneidet im Vergleich zu den Mineraldüngemitteln aufgrund des hohen Energieeinsatzes bei der Verbrennung schlechter ab. Im Vergleich der direkten landwirtschaftlichen Verwertung ergeben sich auf Seiten der Phosphorrückgewinnung Vorteile beim Schwermetalleintrag und der Versauerung.
- Ein wesentlicher Faktor ist die Phosphorkonzentration im Klärschlamm. Bei einer Konzentration von < 20 g/kg TM ist keine Phosphorrückgewinnung vorgeschrieben. Die Mitverbrennung bleibt weiterhin möglich. Bei Phosphor-Konzentrationen bis zu 35 g/kg TM sind Verfahren geeignet, die an der flüssigen Phase oder am Klärschlamm ansetzen. Diese sind tendenziell kostengünstiger als die Rückgewinnungsverfahren aus Asche, insbesondere wenn damit energetische und verfahrenstechnische Vorteile generiert werden können. Voraussetzung ist jedoch, dass die Phosphorrückgewinnung nach einer Bio-P-Elimination und vor einer chemischen P-Elimination ansetzen kann. Kläranlagen, die das nicht gewährleisten, müssten entsprechend umgebaut werden. Ob dies dann insgesamt wirtschaftlicher als die Klärschlammmonoverbrennung ist, muss im Einzelfall betrachtet werden. Bei Phosphorkonzentrationen von deutlich über 20 g/kg sind Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus der Asche geeignet, womit die Verbrennung des Klärschlammes in einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage Voraussetzung ist.
- Im Freistaat Sachsen führen viele Kläranlagen keine Bio-P-Elimination durch. Insofern sind Verfahren, die den Phosphor aus Klärschlammaschen zurückgewinnen, für sächsische Kläranlagen vorrangig geeignet.
- Pyrolyseprodukte sind bisher keine zulässigen Düngemittel gemäß DüMV und können demzufolge nicht unmittelbar als Düngemittel verwertet werden. Pyrolyseprodukte müssen durch geeignete Verfahren aufbereitet und dabei der enthaltene Phosphor zurückgewonnen werden.

5.4 Langzeitlagerung von Klärschlammverbrennungsaschen

Sofern bis Anfang 2029 bzw. 2032 den Aufgabenträgern der kommunalen Abwasserbeseitigung noch keine Anlagenkapazitäten für die Phosphorrückgewinnung zur Verfügung stehen (siehe Kapitel 5.2), ist gemäß Art. 5 Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (§ 3b Abs. 3 AbfKlärV) die Lagerung von Klärschlammverbrennungsaschen und kohlenstoffhaltigen Rückständen unter bestimmten Voraussetzungen in einem Langzeitlager nach § 23 Abs. 6 DepV vor der Durchführung der Phosphorrückgewinnung zulässig. Dafür bedarf es geeigneter Flächen. Im vorliegenden Bericht wurden ausschließlich Deponiestandorte hinsichtlich ihrer Eignung als Langzeitlager geprüft. Andere für ein Langzeitlager potenziell geeignete Flächen wurden nicht betrachtet.

5.4.1 Betrachtung von Deponiestandorten für die Möglichkeit der Langzeitlagerung im Freistaat Sachsen

Aus den noch nicht in der Nachsorgephase befindlichen Deponien im Freistaat Sachsen wurden potenziell geeignete Deponien anhand folgender Kriterien herausgefiltert:

- Mindestfläche des Deponiestandortes von ca. 5 ha,
- Mindestvolumen, das noch zusätzlich eingebracht werden könnte, von ca. 50.000 bis 100.000 m³,
- unkritische Böschungsneigungen auch nach Einrichtung des Langzeitlagers,
- Vorhandensein einer geeigneten Zuwegung mit möglichst geringen Auswirkungen der Transporte auf die Umgebung und
- kein rekultivierter Standort mit abgeschlossener Oberflächenabdichtung.

Daraus ergaben sich die in Tabelle 16 aufgeführten, für eine Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen potenziell geeigneten Deponien im Freistaat Sachsen.

Tabelle 16: Betrachtete Deponien zur Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen

Bezeichnung	Betreiber/Inhaber	DK	Gesamtfläche [ha]	Fläche mit geringer Böschungsneigung/ Plateau [ha]	Restvolumen [m ³] (Stand 2018)
Deponie „Penig“ Wernsdorf	Deutsche Bahn AG	I	12	ca. 8	250.000, je nach Böschungsneigung
Deponie Gröbern	ZAOE	II	4,4	ca. 2,5	< 98.000
Deponie Kunnersdorf	RAVON	II	2,8	< 2,5	< 300.000
Deponie Wetro – Pulschwitzer Feld	PD-Industriegesellschaft GmbH	III	10,9	2,7	< 913.000
Deponie Rothschnöberg	Faber Infra-Bau GmbH	I	3,5 (I. BA)	< 3	504.000
Zentraldeponie Cröbern	WEV GmbH	II	3	3	< 300.000
Industrielle Absetzanlage (IAA) Ostausfahrt Böhlen ⁹	LEAG		90	90	-

Die Betreiber der Deponien Penig und Gröbern standen für Gespräche nicht zur Verfügung. Der ZAOE als Betreiber der Deponie Gröbern hat dies mit der baldigen Schließung der Deponie begründet.

Die Ergebnisse der Bewertung der Eignung von Deponiestandorten für die Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen in technischer und ökonomischer Hinsicht sowie im Einzelnen für die betrachteten Beispielstandorte sind nachfolgend beschrieben.

5.4.2 Technische und ökonomische Betrachtungen

Die Errichtung von Langzeitlagern im Bereich planfestgestellter Deponien kann sowohl mit Synergieeffekten als auch mit Risiken verbunden sein. Zu den Synergieeffekten ist insbesondere die bereits vorhandene Infrastruktur (Zuwegung, Waage, Entwässerung) zu zählen, wodurch die Einrichtung von Langzeitlagern im Bereich genehmigter Deponien im Vergleich zu anderen Standorten ohne derartige Infrastruktur niedrigere Investitionen erfordern würde. Der Betreiber des Langzeitlagers muss nicht gleichzeitig der Betreiber der Deponie sein.

Die Nutzung von Abschnitten in Betrieb befindlicher Deponien als Langzeitlager scheidet überwiegend aus. Die Rückgewinnung von Wertstoffen aus abgelagerten Abfällen ist beim Betrieb von Deponien grundsätzlich nicht vorgesehen, selbst wenn sie für eine fernere Zukunft nicht auszuschließen ist. Die Langzeitlagerung von Aschen aus der Klärschlammverbrennung und aus der Klärschlammmitverbrennung sowie von kohlenstoffhaltigen Rückständen aus der Vorbehandlung von Klärschlamm durch vergleichbare thermische Verfahren ist aufgrund der Regelungen des § 23 Abs. 6 DepV (Verlängerungsoption der Ausnahme von der Nachweispflicht gemäß § 23 Abs. 1 Satz 2) zeitlich unbestimmt und muss mit den Vorgaben des Deponierechts abgestimmt werden. Darüber hinaus erfordert die gleichzeitige Existenz einer Planfeststellung (Deponie) und einer immissionsschutzrechtlichen Genehmigung (Langzeitlager) auf einem Standort gegebenenfalls die Notwendigkeit zur Änderung der Planfeststellung. Da die Langzeitlager durch ein immissionsschutzrechtliches Genehmigungsverfahren und die Deponien im Rahmen eines Planfeststellungsverfahrens zu genehmigen sind, ergeben sich zwei Genehmigungstatbestände auf einer Fläche, welche

⁹ stillgelegte Deponie

sich gegenseitig beeinflussen können. Ein solcher Zustand sollte aus Sicht der LDS grundsätzlich vermieden werden (LDS, 2019). Im Rahmen einer Deponieerweiterung oder -neuplanung stellen sich die Möglichkeiten für Langzeitlager günstiger dar. Bei der Planung von Langzeitlagern ist der Platzbedarf für die für den Rückbau des Langzeitlagers erforderliche Logistik zu berücksichtigen. Bei der Planung eines Langzeitlagers auf Erweiterungsflächen einer Deponie ist sicherzustellen, dass dieses bis zur notwendigen Erweiterung der Deponie beräumt ist.

Langzeitlager auf dem Deponiekörper abgeschlossener Deponien sind aufgrund der statischen Gegebenheiten erst dann möglich, wenn die Setzungserscheinungen abgeschlossen sind und die statischen Gegebenheiten des Deponiekörpers eine weitere Auflast gestatten.

Die Nutzung endabgedeckter Deponien ist mit Risiken behaftet, weil die Endabdeckung in ihrer Funktionalität beeinträchtigt werden kann und nach Beendigung der Langzeitlagerung möglicherweise saniert werden muss.

Bei längerer Lagerung besteht die Gefahr, dass die Aschen zusammenbacken, was einen erhöhten technischen Aufwand für den Rückbau des Langzeitlagers erforderlich machen kann (HMUKLV 2018). Dies würde die Wirtschaftlichkeit der Phosphorrückgewinnung verschlechtern.

Grundsätzlich kommen für die Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen DK-I- bzw. DK-II-Standorte in Frage. Für die Langzeitlagerung sind mindestens die gleichen Kosten anzusetzen, die zum Zeitpunkt der Einlagerung für die Deponierung von Abfällen entstehen. Die Kosten einer DK-III-Deponie sind aufgrund des höheren Sicherheitsstandards i.d.R. höher als die Kosten einer DK-I- oder einer DK-II-Deponie, wodurch die Langzeitlagerung auf DK-III-Standorten i.d.R. unwirtschaftlicher ist. Im Rahmen des Forschungsvorhaben ZwiPhos (Pinnekamp et al., 2014) wurden die in Tabelle 17 dargestellten Kosten für den Betrieb von Langzeitlagern ermittelt. Dabei wurden Standorte ohne vorhandene Infrastruktur geprüft. Kosten eines möglichen Rückbaus der Langzeitlager nach Ausbau der Klärschlammaschen zur Phosphorrückgewinnung und die abschließende Rekultivierung wurden nicht berücksichtigt, da von einer Weiternutzung der Langzeitlagerbereiche als Ablagerungsbereiche ausgegangen wurde.

Tabelle 17: Spezifische Lagerkosten für zwei Beispiele der Lagerklassen (LK) I und II (Kostenstand 2014, netto) (Pinnekamp et al., 2014)

	Mittlere Kosten [EUR/t Asche]
Beispiel 1a (Ausbaugröße Basisfläche 25.000 m ² , Verfüllungszeitraum 18 Jahre, LK II)	42
Beispiel 1b (Ausbaugröße Basisfläche 25.000 m ² , Verfüllungszeitraum 18 Jahre, LK I)	37
Beispiel 2a (Ausbaugröße Basisfläche 45.000 m ² , Verfüllungszeitraum 15 Jahre, LK II)	22
Beispiel 2b (Ausbaugröße Basisfläche 45.000 m ² , Verfüllungszeitraum 15 Jahre, LK I)	19

In Abhängigkeit von der Lagergröße liegen demnach die Kosten für die LK I zwischen 19 und 37 EUR/t und für die LK II zwischen 22 und 42 EUR/t.

5.4.3 Eignung der betrachteten Deponiestandorte

Die Deponien in Kunnersdorf, Wetro und Cröbern verfügen in unterschiedlichem Umfang über Erweiterungs- bzw. Nebenflächen, auf denen die Errichtung von Langzeitlagern möglich wäre, ohne in den laufenden Deponiebetrieb einzugreifen. Vorteil der Nutzung dieser Flächen als Langzeitlager wäre, dass Synergieeffekte mit dem Deponiebetrieb entstünden und die gleichen geologischen Voraussetzungen (bspw. Vorhandensein einer geologischen Barriere) anzutreffen sind wie im Bereich des Deponiekörpers.

Besonders günstig sind dabei die Rahmenbedingungen auf der Deponie Kunnersdorf. Der Standort verfügt über ausreichend Erweiterungsflächen, die die Einrichtung eines separat gehaltenen Langzeitlagers ermöglichen, welcher den Deponiebetrieb nicht beeinflusst.

Am Standort der DK-III-Deponie Wetro stehen ebenfalls ausreichend Erweiterungsflächen zur Verfügung. Allerdings ist hier mit höheren Kosten zu rechnen, da die Annahmepreise für das Langzeitlager vergleichbar mit denen für die Deponierung von Abfällen wären.

Auf der Deponie Cröbern stehen geeignete Nebenflächen nur in geringem Umfang zur Verfügung. Ein Zwischenlager auf dem Deponiekörper wird durch den Betreiber aus statischen Gründen ausgeschlossen.

Bei den Deponien IAA Ostausfahrt Böhlen und Rothschönberg läuft die Plangenehmigung bis 2029 aus, so dass die Nutzung der jeweiligen Standorte nach 2029 als Langzeitlager nicht beurteilt werden kann bzw. bereits anderweitige planungsrechtliche Festlegungen bezüglich der Nachnutzung existieren.

5.4.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Errichtung von Langzeitlagern für Aschen aus der Klärschlammverbrennung und aus der Klärschlammmitverbrennung sowie von kohlenstoffhaltigen Rückständen aus der Vorbehandlung von Klärschlamm durch vergleichbare thermische Verfahren ist eine Notfalloption für den Fall, dass keine geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahren ab 2029 zur Verfügung stehen bzw. die Kapazitäten der Phosphorrückgewinnungsverfahren nicht ausreichen. Sie führt zu zusätzlichen Kosten der Phosphorrückgewinnung und ist grundsätzlich zu vermeiden.

Die Nutzung von Deponiestandorten für die Errichtung von Langzeitlagern führt aufgrund der bereits vorhandenen Infrastruktur in der Regel zu Kostenvorteilen.

Dennoch ist darauf zu achten, dass die Langzeitlager vom eigentlichen Deponiebetrieb getrennt errichtet werden, da sich eine Langzeitlagerung in der Regel nicht mit dem Deponiebetrieb vereinbaren lässt, der insbesondere eine Rückholung der eingelagerten Materialien nicht vorsieht. Die besten Voraussetzungen besitzen insofern Deponiestandorte, die über entsprechend große Erweiterungsflächen verfügen. Über diese Voraussetzungen verfügen von den betrachteten Standorten vor allem die Deponie Kunnersdorf und die Deponie Wetro.

6 Aspekte der zukünftigen Klärschlamm-entsorgung

6.1 Abfallwirtschaftsplanung

Der Abfallwirtschaftsplan enthält in seinem Kapitel „Abfallaufkommen und Entwicklungstrends“ auch Aussagen zu Abfällen aus der kommunalen Abwasserbeseitigung, insbesondere zu Klärschlamm. Dort finden sich neben Angaben zum Aufkommen vergangener Jahre sowie einer Prognose auch Aussagen zur Entsorgung. Diese Aussagen basieren insbesondere auf der jeweils zuvor erarbeiteten Klärschlammkonzeption. Der Abfallwirtschaftsplan enthält auch Empfehlungen an die kommunalen Aufgabenträger der Abwasserbeseitigung zur Aufgabenerledigung. Bei zukünftigen Fortschreibungen des Abfallwirtschaftsplans können für Klärschlamm Grundsätze und Schlussfolgerungen aufgenommen werden. Derzeit sind im Abfallwirtschaftsplan weder Grundsätze noch Schlussfolgerungen für Klärschlamm enthalten. Ausweisungen im Abfallwirtschaftsplan können jedoch nur für Abfälle zur Beseitigung für die Entsorgungspflichtigen für verbindlich erklärt werden. Für Klärschlamm, der verwertet wird, können keine verbindlichen Ausweisungen im Abfallwirtschaftsplan vorgenommen werden.

6.2 Thermische Entsorgung

Für den thermischen Entsorgungsweg stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, deren zukünftige Entwicklungen nachfolgend beschrieben werden.

6.2.1 Klärschlammmonoverbrennung

Die am weitesten verbreitete Technologie zur Klärschlammmonoverbrennung ist das Wirbelschichtverfahren mit derzeit über 20 Anlagen in Deutschland (UBA 2018). In Wirbelschichtanlagen wird entwässertes oder vorgetrockneter Klärschlamm bei Temperaturen zwischen 850 und 950°C verbrannt. Die Klärschlämme müssen soweit getrocknet sein, dass sie einen Heizwert von 4.000 bis 4.500 kJ/kg aufweisen, was einem TM-Gehalt von 40–50 % entspricht. Klärschlämme mit einem Heizwert von 4.500 kJ/kg verbrennen autotherm, so dass die meisten Anlagen ohne Zusatzbrennstoff betrieben werden können. Die in diesen Anlagen anfallenden Aschen sind in Anlage 2 Tabelle 6.2 Nr. 6.2.3 DüMV i. V. m. Tabelle 7.4 Nr. 7.4.3 nach Maßgabe von Zeile 7.3.16 als Phosphatdünger gelistet.

Im Hinblick auf die Kapazitäten lassen sich keine Aussagen treffen, mit welchen Durchsätzen diese Anlagen wirtschaftlich zu betreiben sind. Dies hängt von den konkreten Rahmenbedingungen des Standorts ab. Es werden Anlagen verschiedenster Größen bereits betrieben oder sind in Planung. Selbst kleine Anlagen, wie die auf der Insel Rügen mit einem Jahresdurchsatz von 2.500 t TM (inkl. Rechen- und Strandgut) sollen sich wirtschaftlich betreiben lassen (Heidrich, 2019).

Abbildung 14 zeigt die Verteilung der Standorte der gegenwärtig bestehenden und derzeit geplanten Standorte der thermischen Klärschlamm Entsorgung in Mitteldeutschland.

In Sachsen-Anhalt sind in unmittelbarer Nähe zu Sachsen verschiedene Aktivitäten zu verzeichnen. In der Klärschlammmonoverbrennungsanlage der GWK - Gemeinschaftskläwerk Bitterfeld-Wolfen GmbH werden jährlich bereits ca. 16.000 t TM Klärschlämme aus überwiegend industriellem Abwasser für den Industriepark Bitterfeld-Wolfen sowie den Abwasserzweckverband „Westliche Mulde“ thermisch behandelt (GWK, o. J.). Fünf weitere Monoverbrennungsanlagen sind an folgenden Standorten geplant (siehe Abbildung 14):

- Bitterfeld (60.000 t TM/a) (Bunthoff, 2019),
- Beuna (30.000 t TM/a) (EuWID, 2020a),
- Halle-Lochau (8.250 t TM/a) (sludge2energy, 2019),
- Leuna (32.500 t TM/a) (PICON, 2020),
- Zorbau (15.000 t TM/a) (PICON, 2020).

Ob sich die Betreiber dieser Anlagen an Ausschreibungen sächsischer Aufgabenträger beteiligen, dürfte insbesondere davon abhängen, inwieweit in diesen Anlagen jeweils noch Kapazitäten verfügbar sind. Deshalb ist offen, ob diese Kapazitäten Beiträge zur Sicherheit der zukünftigen Entsorgung von Klärschlämmen aus Sachsen leisten werden.

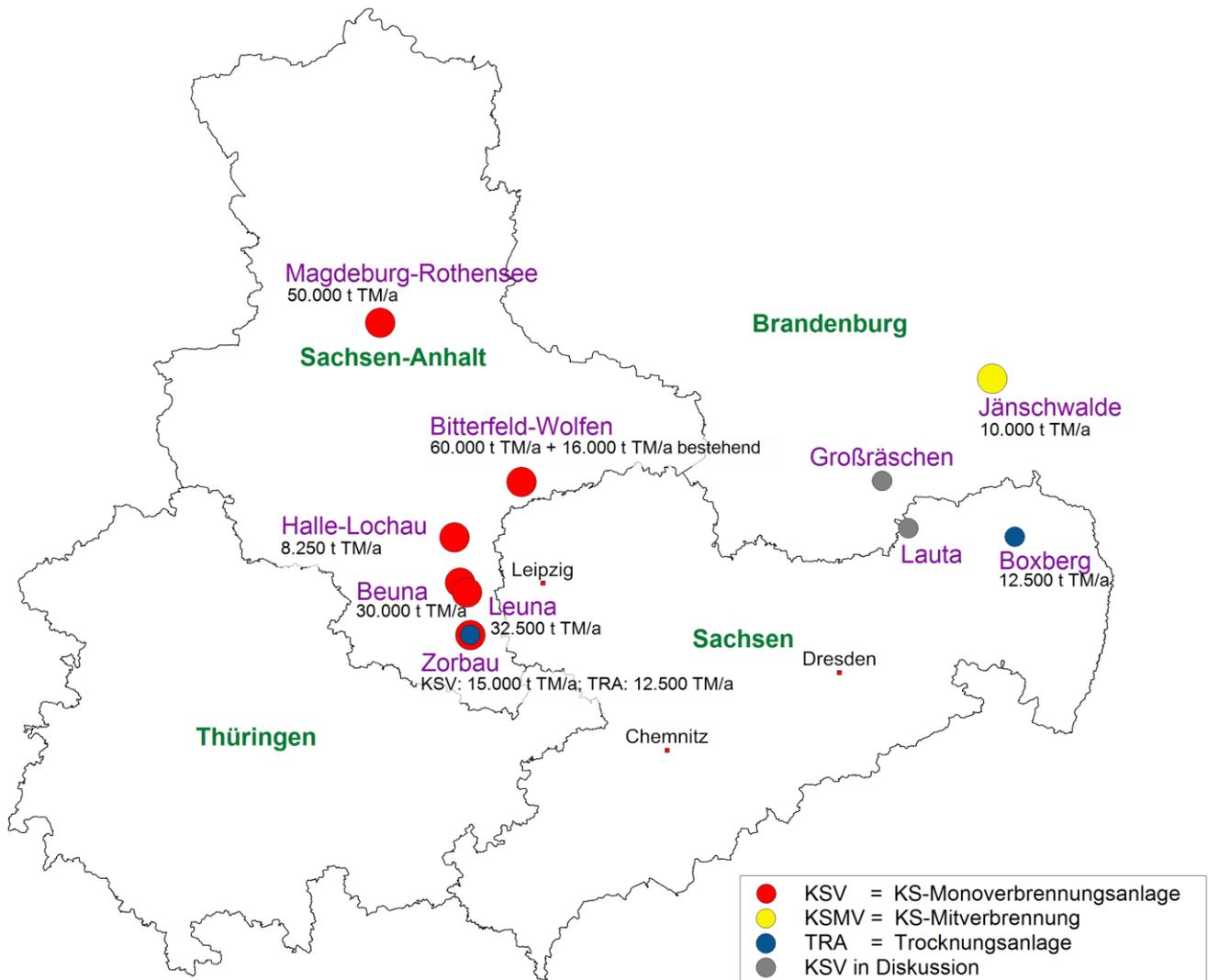


Abbildung 14: Standorte der bestehenden und geplanten Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung in Mitteldeutschland (Stand 2020) (PICON [2020], eigene Recherche)

Für den Freistaat Sachsen sind derzeit keine standortkonkreten Planungen bekannt.

Die Mitglieder des Arbeitskreises Westsachsen planen die Errichtung einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage. Zu diesem Zweck wurde die Klärschlammmanagement Westsachsen GmbH (KMW GmbH) gegründet. Unternehmensgegenstand der KMW GmbH ist die Vorbereitung, der Bau und der Betrieb einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage mit einer möglichen Phosphorrückgewinnung einschließlich Energie- und Wärmerückgewinnung.

Am Standort der Abfallverbrennungsanlage T.A. Lauta besteht das Potenzial zur Errichtung einer Monoverbrennungsanlage für Klärschlamm. Im Falle ihrer Errichtung könnten hier Synergieeffekte mit der bereits in Betrieb befindlichen Abfallverbrennungsanlage entstehen. Solche Effekte bestünden insbesondere im Bereich der Energienutzung (bspw. zur Klärschlamm-trocknung) (Toedter, 2018).

Im Rahmen der Untersuchung wurden keine spezifischen Standorte für Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Sachsen betrachtet. Aus Sicht des Raumordnungsrechts und des Immissionsschutzrechts ist grundsätzlich jedes Industriegebiet als Standort geeignet.

6.2.2 Mitverbrennung in Kohlekraftwerken

Die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken ist derzeit der wesentliche Entsorgungsweg der Klärschlamm Entsorgung im Freistaat Sachsen (siehe Kapitel 3.4). Der Klärschlamm wird der Braunkohle zugemischt, gemeinsam mit dieser gemahlen und getrocknet. Anschließend wird das Gemisch in den Verbrennungsraum geblasen und verbrannt.

In Sachsen erfolgt die Mitverbrennung von Klärschlämmen in den Braunkohlekraftwerken Boxberg und Lippendorf. Dort wurden im Jahr 2018 insgesamt 305.998 t OS (25 % TM, entspricht ca. 75.000 t TM) Klärschlamm mitverbrannt, davon 35 % aus dem Freistaat Sachsen. Die Abschaltung der Kraftwerksblöcke, welche für die Klärschlammmitverbrennung genutzt werden, erfolgt dem Stilllegungspfad Braunkohle (BMWi 2020) zufolge schrittweise zum 31.12.2029 für Boxberg und zum 31.12.2035 für Lippendorf.

Nach Aussage der Kraftwerksbetreiber ist die Klärschlammverwertung durch Mitverbrennung in den Braunkohlekraftwerken bis mindestens 2029 gesichert (Homann u. Kappa, 2019). Zwar liegt die genehmigte Kapazität zur Mitverbrennung deutlich über den tatsächlichen Einsatzmengen (Boxberg: 42.000 t TM/a, Lippendorf: 93.000 t TM/a [Langenohl, 2019]), jedoch sind aus technischen Gründen (Revisionszeiten, energetische Anforderungen an den Kraftwerksbetrieb) die realen Einsatzmengen weitaus geringer. Inwieweit der Umfang der Mitverbrennung aufrechterhalten werden kann, hängt nicht zuletzt von der Entwicklung bei den erneuerbaren Energien ab. Diese haben bei der Einspeisung in das Stromnetz Vorrang, so dass Braunkohlekraftwerke flexibel auf den Bedarf reagieren müssen. Die sich dadurch ergebende Volatilität der Verbrennungskapazitäten in Braunkohlekraftwerken erfordert zusätzliche Zwischenlagerkapazitäten für Klärschlämme (Homann u. Kappa, 2019). Am Standort Boxberg errichtet die Veolia Wasser Deutschland GmbH eine Klärschlamm Trocknungsanlage. Die getrockneten Klärschlämme sollen im Kraftwerk Boxberg mitverbrannt werden. Mit der Inbetriebnahme dieser Anlage, welche für 2021 geplant ist, würde sich die Mitverbrennungskapazität im Kraftwerk Boxberg um 50.000 t OS/a (ca. 12.500 t TM/a) erhöhen (Veolia, 2019).

Aufgrund der Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung wird dieser für Sachsen wichtige Entsorgungsweg zukünftig nur noch eine geringe Rolle spielen. Mit Ausnahme einiger weniger Kläranlagen der GK4b und GK5 (z. B. Chemnitz-Heinersdorf) nutzen bislang nahezu alle großen Kläranlagen in Sachsen die Mitverbrennung zur Klärschlamm Entsorgung. Mit 30.418 t TM Klärschlamm wurden im Jahr 2017 ca. 45 % der direkt entsorgten Klärschlämme mitverbrannt (siehe Kapitel 3.4). Nach 2029 werden nur noch Klärschlämme durch Mitverbrennung entsorgt werden, die bereits ein Phosphorrückgewinnungsverfahren durchlaufen haben bzw. einen Phosphorgehalt von < 20 g/kg aufweisen. Durch den beschlossenen Kohleausstieg bis 2038 ist diese Verwertungsmöglichkeit zudem zeitlich begrenzt.

6.2.3 Mitverbrennung in thermischen Abfallbehandlungsanlagen

In Sachsen wird mit der T.A. Lauta lediglich eine Abfallverbrennungsanlage für Restabfälle betrieben. Zwar ist die Mitverbrennung von Klärschlamm Bestandteil der Anlagengenehmigung, allerdings ist die Mitverbrennung vom Anlagenbetreiber weder beabsichtigt noch wäre eine nennenswerte Mitverbrennung von Klärschlämmen möglich. Wegen der Schwefelgehalte der Klärschlämme kann der genehmigte Schwefeldioxid-Emissionsgrenzwert nicht mehr eingehalten werden.

Ob thermische Abfallbehandlungsanlagen in benachbarten Bundesländern für die Abfallentsorgung von Klärschlämmen aus Sachsen zukünftig eine Rolle spielen werden, bleibt offen.

6.2.4 Mitverbrennung in Zementwerken

Zementwerke verwerten überwiegend vollgetrocknete Klärschlämme mit geringen Phosphorkonzentrationen. Insofern ist dieser Verwertungsweg nur geeignet für Klärschlämme, die bereits ein Phosphorrückgewinnungsverfahren durchlaufen haben oder der zukünftigen Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung aufgrund geringer Phosphorgehalte im Klärschlamm nicht unterliegen. Bei der Verwertung in Zementwerken fallen keine Reststoffe an, da diese in die Zementmatrix eingebunden werden.

Im Freistaat Sachsen gibt es keine Zementwerke. Die nächstgelegenen Zementwerke, die Sekundärbrennstoffe verwerten können, sind die Anlagen in Deuna (Thüringen), Karsdorf und Bernburg (Sachsen-Anhalt) sowie Rüdersdorf (Brandenburg). Ob die genannten Anlagen für die Abfallentsorgung von Klärschlämmen aus Sachsen zukünftig eine Rolle spielen werden, bleibt offen.

6.2.5 Sonstige thermische Behandlungstechnologien

Sonstige thermische Behandlungstechnologien sind insbesondere Vergasungsverfahren und Pyrolyseverfahren.

Bei der Vergasung wird Klärschlamm teiloxydiert. Es entsteht ein Synthesegas, das im Wesentlichen aus Kohlenmonoxid sowie Wasserstoff besteht und energetisch verwertet werden kann. Der anfallende phosphorhaltige Abfall ist nicht im Anhang 2 der DüMV gelistet. Er kann deshalb nicht als Düngemittel in den Verkehr gebracht und in der Landwirtschaft angewendet werden. Vergasungsanlagen für Klärschlamm werden z. B. in Balingen und Mannheim (Baden-Württemberg) betrieben.

Die Pyrolyse von Klärschlamm erfolgt unter Sauerstoffabschluss. Das entstehende Pyrolysegas wird meist im Prozess verwertet. Der anfallende Pyrolysekoks ist ebenfalls nicht im Anhang 2 der DüMV aufgeführt. Eine Pyrolyseanlage für Klärschlamm befindet sich in Linz am Rhein. In Sachsen wird derzeit durch den Zweckverband Frohnbach eine Pyrolyseanlage errichtet (siehe Kapitel 5.2), die von ihrer Größe für die Klärschlammmenge des Zweckverbandes ausgelegt ist.

Als weiteres Verfahren ist die Hydrothermale Carbonisierung (HTC) in der Entwicklung. Bei den HTC-Verfahren wird unter hohem Druck und hohen Temperaturen in wässrigen Reaktionsbedingungen sogenannte Biokohle erzeugt. Dieses Endprodukt ist ebenfalls nicht in Anhang 2 der DüMV aufgeführt. Nachteilig ist bei diesen Verfahren, dass Abwässer anfallen, die behandelt werden müssen. HTC-Verfahren sind bislang lediglich im Pilotmaßstab umgesetzt. In Sachsen wird zu dieser Thematik Grundlagenforschung am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ) betrieben, bspw. von 2013 bis 2016 im Rahmen des Forschungsprojektes CARBOWERT (UFZ, 2018).

6.2.6 Zusammenfassende Bewertung der thermischen Klärschlamm-entsorgung

Der derzeit in Sachsen einzige thermische Entsorgungsweg ist die Mitverbrennung in den Braunkohlekraftwerken Lippendorf und Boxberg, die spätestens ab 2029/32 nur noch eingeschränkt genutzt werden kann. Dann ist die Mitverbrennung aufgrund der Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung nur noch für Klärschlämme mit einem Phosphorgehalt ≤ 20 g/kg TM und für Klärschlämme, aus denen Phosphor bereits zurückgewonnen wurde, zulässig. Die Option der Mitverbrennung in Braunkohlekraftwerken ist lt. Stilllegungspfad Braunkohle (BMW, 2020) zwar über 2029 hinaus gesichert, endet allerdings spätestens am 31.12.2035 mit der Stilllegung des Kraftwerks Lippendorf.

Der bedeutendste Entsorgungsweg für Klärschlämme nach 2029/32 wird aufgrund der Regelungen der AbfKlärV zukünftig die Klärschlammmonoverbrennung sein. Ursächlich für diese Entwicklung ist zum einen der zu erwartende weitere Rückgang der bodenbezogenen Verwertung (siehe Kapitel 6.3). Zum anderen ist das Interesse der Kläranlagenbetreiber, die Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage zu betreiben, gering. Diese Verfahren, die Phosphor aus der flüssigen Phase zurückgewinnen, erfordern in der Regel eine Bio-P-Elimination anstelle der weitverbreiteten chemischen Fällung. Von den Betreibern einer Kläranlage der GK4b und GK5 im Freistaat Sachsen zieht lediglich die Stadt Görlitz den Einsatz des PhosPhorce-Verfahrens auf der Kläranlage Görlitz-Nord in Erwägung, wartet allerdings das Ergebnis des Pilotversuchs in Schönebeck/Elbe ab (siehe Kapitel 6.4).

Bislang sind keine standortkonkreten Planungen zur Errichtung von Klärschlammmonoverbrennungskapazitäten im Freistaat Sachsen bekannt. Allerdings hat der Arbeitskreis Westsachsen eine GmbH zum Zwecke der Entwicklung eines Projektes zur Klärschlammmonoverbrennung gegründet. Darüber hinaus errichtet der Zweckverband Frohnbach eine Pyrolyseanlage zur Behandlung der im Zweckverband anfallenden Klärschlämme.

Potenzial zur Errichtung einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage mit Möglichkeiten zur interkommunalen Zusammenarbeit und zur Nutzung von Synergien mit einer vorhandenen thermischen Abfallbehandlungsanlage werden bspw. am Standort der T.A. Lauta gesehen.

6.3 Bodenbezogene Verwertung

6.3.1 Verwertung in der Landwirtschaft

Nur noch 10 % der in Sachsen anfallenden Klärschlämme wurden im Jahr 2017 in der Landwirtschaft verwertet (siehe Kapitel 3.4). Ursache des Rückgangs der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung sind die Auswirkungen der Novellierung des Düngerechts. Dadurch verknappen sich die für die Ausbringung von Klärschlämmen potenziell zur Verfügung stehenden Flächen.

Mit der Ausweitung der Sperrfristen für die Ausbringung N-haltiger Dünger in den Herbstmonaten (siehe Kapitel 2.2.2) werden mehr Lagerkapazitäten benötigt. Die Ausbringung konzentriert sich zunehmend auf das Frühjahr. Zudem ist in vielen Landwirtschaftsbetrieben der ordnungsgemäßen und effektiven Verwertung der betriebseigenen Wirtschaftsdünger und Gärreste Priorität einzuräumen.

Die Auswirkungen

- der durch § 6 Abs. 4 DüV gewährten höheren Flexibilität beim Einsatz von Komposten (510 kg Stickstoff (N)/ha innerhalb drei Jahre anstatt 170 kg N/ha*a),
- der für die Ausbringung von Komposten gemäß § 6 Abs. 8 Satz 2 DüV geltenden verkürzten Sperrfrist

zeigen sich gegenwärtig in der Steigerung des Einsatzes von Klärschlammkomposten im Vergleich zur Ausbringung von Klärschlamm (siehe Kapitel 3.4).

Aufgrund der zu erwartenden weiteren Verschärfung der düngerechtlichen Regelungen wird sich die Situation der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung zukünftig weiter verkomplizieren.

Im Freistaat Sachsen befinden sich nitratbelastete Flächen (siehe Kapitel 2.2.3), so dass die zukünftig zu erwartende weitere Verschärfung der düngerechtlichen Regelungen (siehe Kapitel 2.2.2) Auswirkungen auf die Düngung landwirtschaftlicher Flächen vor allem in diesen Regionen des Freistaates haben werden. Insbesondere werden durch die schlagbezogene Obergrenze von 170 kg/ha Stickstoff für organische oder organisch-mineralische Düngemittel die Einsatzmöglichkeiten weiter eingeschränkt. Der Absatz von Klärschlamm und Klärschlammkomposten in der Landwirtschaft wird sich dadurch weiter verringern.

Ein weiteres Problem, welches die landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm bzw. Klärschlammkomposten mittel- bis langfristig in Abhängigkeit bundesrechtlicher Entscheidungen verringern bzw. gänzlich unterbinden könnte, ist die Verunreinigung mit Mikroplastik. Klärschlämme stellen verfahrensbedingt bei der Abwasserreinigung eine Senke für Mikroplastik dar. Bspw. wurden im Rahmen einer Untersuchung von Mintenig et al. (2014) in Klärschlämmen ausgewählter Kläranlagen des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes (OOWV) Belastungen an Mikroplastikpartikeln zwischen 1.041 und 24.129 Partikeln pro kg TM Klärschlamm festgestellt. Mikroplastik wird bspw. durch Pflegeprodukte (Duschgels, Peelingcremes, Zahnpasta), Waschen von Textilien und Reifenabrieb (über Niederschlagswasser) in Kläranlagen eingetragen. Erste Ansätze zur Minimierung des Problems werden diskutiert, bspw. ein Verbot von Mikroplastik in Kosmetika (Bundesrat, 2019). Derzeit wird über die Quellen, den Abbau, die Transportwege (z. B. Boden-Wasser) sowie die Auswirkungen von Mikroplastik intensiv geforscht. Inwieweit sich die erst zukünftig zu erwartenden Ergebnisse auf die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen auswirken werden, ist derzeit noch nicht abzusehen.

Des Weiteren werden Schadstoffgehalte aus Arzneimitteln in Klärschlämmen diskutiert. Die bodenbezogene Klärschlammverwertung gilt als eine der Haupteintragsquellen von Schadstoffen aus Arzneimitteln in die Umwelt. Stenzel et al. (2019) haben festgestellt, dass die in Klärschlämmen vorhandenen Schadstoffe aus Arzneimitteln durch Phos-

phosphorrückgewinnungsverfahren signifikant reduziert werden (siehe Kapitel 5.3). Während diese Schadstoffe durch thermische Verfahren oberhalb 500°C vollständig zerstört werden, findet eine Reduzierung auch durch Kristallisations- und Fällungs- sowie bei dem HTC-Verfahren statt. Die Phosphorrückgewinnung leistet insofern einen positiven Beitrag zur Verringerung des Eintrags von Schadstoffen aus Arzneimitteln in Böden.

Die geschilderten Entwicklungen können dazu führen, dass die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen zukünftig nur noch für geringe Klärschlammengen mit geringen Schad- und Störstoffgehalten relevant sein oder ganz eingestellt wird. Derzeit ist eine solche Entwicklung allerdings noch nicht absehbar.

6.3.2 Verwertung im Landschaftsbau

Mit Novellierung der AbfKlärV im Jahr 2017 wurde deren Anwendungsbereich auf Maßnahmen des Landschaftsbaus erweitert. Böden bei Maßnahmen des Landschaftsbaus sind Flächen, die ohne land- oder forstwirtschaftliche Nutzung gepflegt werden oder auf denen eine durchwurzelbare Bodenschicht hergestellt wird. Zu den Böden des Landschaftsbaus zählen insbesondere Rekultivierungsflächen, Straßenbegleitflächen, Dämme, Lärmschutzwälle und Sportanlagen sowie innerhalb bebauter Ortsteile gelegene öffentliche Parkanlagen.

Zum Zwecke der Verwertung der Klärschlämme bei landschaftsbaulichen Maßnahmen werden diese häufig vor der eigentlichen Verwertung kompostiert und mit anderen bodenähnlichen Materialien (bspw. Ton oder Sand) zur Herstellung von Bodensubstraten mit definierten Eigenschaften vermischt.

Statistische Daten zu den genutzten Verwertungswegen für Klärschlämme im Landschaftsbau liegen nicht vor. Nach Auskunft der befragten Entsorgungsunternehmen sind derzeit Deponierekultivierungen in Sachsen und im benachbarten Sachsen-Anhalt der wesentliche Entsorgungsweg für Klärschlämme aus Sachsen im Landschaftsbau. Diese Verwertungswege sollen auch zukünftig genutzt werden, allerdings ist die Verfügbarkeit von geeigneten Verwertungsflächen rückläufig. Der Verwertung von Klärschlämmen in landschaftsbaulichen Rekultivierungsmaßnahmen verläuft zudem sehr diskontinuierlich. Bergbauliche Rekultivierungen spielen keine Rolle (Staub, 2018; Graumüller, 2019).

6.3.3 Zusammenfassende Bewertung der bodenbezogenen Klärschlammverwertung

Die bodenbezogene Verwertung ist in der Landwirtschaft und im Landschaftsbau unter bestimmten Bedingungen (siehe Tabelle 3) weiterhin möglich. Aufgrund der zu erwartenden weiteren Verschärfung der düngerechtlichen Regelungen (siehe Kapitel 2.2) wird der Anteil bodenbezogen verwerteter Klärschlämme allerdings weiter zurückgehen. Darüber hinaus zeichnet sich eine Verringerung der sowohl für die landwirtschaftliche als auch die landschaftsbauliche Verwertung zur Verfügung stehenden Flächen ab.

6.4 Stand und Bewertung der Vorhaben der Akteure zur Umsetzung der AbfKlärV in Sachsen

6.4.1 Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung

In den letzten Jahren hat die überwiegende Zahl der Aufgabenträger der Abwasserbeseitigung mit Kläranlagen der GK5 und GK4b Verträge zur Klärschlamm Entsorgung mit kurz- und mittelfristigen Vertragslaufzeiten abgeschlossen, wobei viele Verträge mit Verlängerungsoptionen ausgestattet sind (siehe Tabelle 18). Zahlreiche Vertragsverhältnisse enden innerhalb der nächsten fünf Jahre, sofern die Verlängerungsoptionen nicht genutzt werden. Einige Aufgabenträger haben langfristige Verträge abgeschlossen, die eine Laufzeit bis zum Beginn der Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung ab 2029 haben.

Die vorgesehenen Entsorgungswege bis 2029/32 sowie die Planungen der Aufgabenträger, welche Kläranlagen der GK5 und GK4b (Auswahl) betreiben, für die Zeit nach 2029/32 zeigt Tabelle 18.

Tabelle 18: Ist-Stand sowie Planungen zur Klärschlamm Entsorgung der Aufgabenträger für Kläranlagen der GK5 und GK4b in Sachsen (Quelle: eigene Recherchen und Ausschreibungsergebnisse, 2020)

	Ist-Stand bis 2029/32	Aktivitäten und Planungen für Zeitraum ab 2029/32
ZKA Dresden-Kaditz (GK5)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2020 (Verlängerungsoption um ein Jahr)	Klärschlamm Entsorgung vergeben als Dienstleistung: Vertragslaufzeit: 01.01.2022–31.12.2031 mit zweimaliger Verlängerungsoption um jeweils fünf Jahre), thermische Behandlung der Klärschlämme der KA Dresden-Kaditz ab spätestens 01.01.2024 in einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage, Phosphorrückgewinnung spätestens ab 01.01.2029 (Menge: 43.500 t OS/a, im Mittel 29–30 % TM)
KW Leipzig-Rosental (GK5)	Vertrag bis 30.06.2022	Klärschlamm Entsorgung vergeben als Dienstleistung für die Städte Leipzig (Los 1), Halle/Saale (Los 2) und Weißenfels (Los 3): Los 1: Thermische Behandlung der Klärschlämme der KA Rosental sowie der Kläranlagen Markkleeberg, Markranstädt, Taucha und Gotha-Jesewitz ab dem 01.01.2023, ab spätestens 01.01.2025 in einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage, Phosphorrückgewinnung spätestens ab 01.01.2029 (Menge Rosental: 36.400–44.000 t OS/a (23-29 % TS), Menge Nebenkäranlagen: 5.600–7.000 t OS/a (20-24 % TS), Vertragslaufzeit: 01.01.2023–31.12.2032 mit zweimaliger Verlängerungsoption um jeweils fünf Jahre)
Arbeitskreis Westsachsen, u. a. mit den Kläranlagen:		Gründung der Klärschlammmanagement Westsachsen GmbH (KMW GmbH) zum Zwecke der Vorbereitung, des Baus und des Betriebs einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage mit einer möglichen Phosphorrückgewinnung einschließlich Energie- und Wärmerückgewinnung (durch Regional-Wasser-/Abwasser-Zweckverband Zwickau/Werdau, Zweckverband Wasserwerke Westerstzgebirge, Zweckverband Kommunale Wasserversorgung/Abwasserentsorgung Mittleres Erzgebirgsvorland und eins energie in sachsen GmbH & Co. KG; Kapazität der Monoverbrennungsanlage noch nicht festgelegt, Vorhaben ist offen für die Beteiligung weiterer Aufgabenträger
ZKA Chemnitz-Heinersdorf (GK5)	Entsorgungsvertrag abgeschlossen ab 01.01.2021 für zweimal drei Jahre und anschließend für die eins AG einseitiger dreimaliger Verlängerungsoption für jeweils ein Jahr. Für das Jahr 2029 wurde das Phosphorrecycling ausgeschrieben und beauftragt.	
ZKA Zwickau (GK5)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2023 (Verlängerungsoption von maximal 5 (3+2) weiteren Jahren)	
Interessengemeinschaft Klärschlamm Entsorgung Ost Sachsen, u. a. mit den Kläranlagen:		Ausschreibung eines Dienstleistungsvertrages (Monoverbrennung mit P-Rückgewinnung, ab 2026, langfristig); eigene Verbrennungsanlage wurde geprüft, allerdings wegen mangelnder Wirtschaftlichkeit aufgrund zu geringer Mengen verworfen
KA Görlitz-Nord (GK5)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2021, weitere Ausschreibung geplant	
ZKA Zittau (GK4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2020, weitere Ausschreibung für den Zeitraum 2021-2030 geplant	
KA Bautzen (GK4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2025	
Zweckverband Wasser und Abwasser Vogtland (ZWAV) (u. a. mit den Kläranlagen ZKA Plauen (GK5) und ZKA Rodewisch (GK4b)	Vertrag bis 31.12.2028 (ohne Verlängerungsoption)	Ausschreibung eines Dienstleistungsvertrages
ZKA Weidensdorf (GK4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2022 (Verlängerungsoption bis 31.12.2024)	keine Informationen
GKA Meißen (GK5)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2024	Ausschreibung eines Dienstleistungsvertrages
ZKA Freiberg (GK4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2028 (mit Option der fünfmaligen Verlängerung um jeweils ein Jahr)	Ausschreibung eines Dienstleistungsvertrages, keine P-Rückgewinnung auf Kläranlage mehr vorgesehen
KA Radeberg (GK4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2022, weitere Ausschreibung geplant	Ausschreibung eines Dienstleistungsvertrages

ZKA Schönefeld (GK 4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2022, Verlängerungsoption bis 2032	Interesse an Zusammenarbeit mit weiteren regionalen/kommunalen Abwasserentsorgern (Abstimmungen hierzu laufen), parallel erfolgt intensive Beobachtung der allgemeinen Marktsituation, um ggf. auf anderweitige Angebote/Möglichkeiten reagieren zu können
KA Riesa (GK4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2019 (Verlängerung um ein Jahr möglich)	Ausschreibung eines Dienstleistungsvertrages
Zentrales Großklärwerk der MUEG mbH in Espenhain (GK4b)	MUEG ist Makler und verfügt selbst über Kontingente in der Mitverbrennung, die fortlaufend neu ausgehandelt werden	MUEG prüft derzeit die Machbarkeit aller möglicher Optionen, bislang besteht keine Präferenz
KA Hoyerswerda (GK4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2022; danach wird eine langfristige Lösung, auch über 2032 hinaus, angestrebt	Ziel, über 2032 hinaus, ist eine Entsorgung über die Interessengemeinschaft Klärschlamm Entsorgung Ostachsen in einer zentralen noch zu errichtenden Monoverbrennung, vorzugsweise am Standort TA Lauta.
ZKA Schlematal (GK4b)	Vertrag bis 31.12.2022 Ausschreibung der thermischen Verwertung, Vertragslaufzeit: 01.01.2023–31.12.2027 mit Verlängerungsoption bis maximal 31.12.2029, Verfahren wegen Unwirtschaftlichkeit der Angebote im Januar 2020 eingestellt, Ausschreibung wird wiederholt	Kooperation mit Arbeitskreis Westsachsen angestrebt
ZKA Panitzsch (GK4b)	Entsorgungsvertrag bis 31.12.2021	Klärschlammkonzeption wurde beauftragt (Fertigstellung bis 31.12.2023)

Die Aufgabenträger mit den größten Klärschlamm-mengen in Sachsen, die Stadtentwässerung Dresden GmbH, die Kommunale Wasserwerke Leipzig GmbH und die eins energie in Sachsen GmbH & Co. KG, haben die Klärschlamm-entsorgung als Dienstleistung an Dritte vergeben. Die Ausschreibungen umfassten jeweils die Monoverbrennung der bei ihnen anfallenden Klärschlämme und die Phosphorrückgewinnung aus der anfallenden Asche (siehe Tabelle 18). Die Ausschreibungen erfolgten im Jahr 2020. Während die Ausschreibung der Stadtentwässerung Dresden GmbH lediglich die Klärschlamm-mengen der ZKA Dresden-Kaditz (ca. 12.800 t TM/a) und die der eins energie in Sachsen GmbH & Co. KG lediglich die Klärschlamm-mengen der ZKA Chemnitz-Heinersdorf (ca. 5.500 t TM/a) umfasst, sind in die Ausschreibung der Kommunalen Wasserwerke Leipzig GmbH neben den Klärschlamm-mengen der KA Leipzig-Rosental vier weitere Kläranlagen nahe der Stadt Leipzig einbezogen (ca. 10.700–13.000 t TM/a). Für die Klärschlammmonoverbrennung werden Anlagen außerhalb Sachsens genutzt.

Die Mitglieder des Arbeitskreises Westsachsen, die eins energie in Sachsen GmbH & Co. KG als Betreiber der Kläranlage Chemnitz, der Regional-Wasser-/Abwasser-Zweckverband Zwickau/Werdau, der Zweckverband Wasserwerke Westergebirge sowie der Zweckverband Kommunale Wasserver- und Abwasserentsorgung Mittleres Erzgebirgsvorland, planen eine gemeinsame, eigene Klärschlammverwertung einschließlich Phosphorrückgewinnung. Insgesamt fällt in den durch den Arbeitskreis Westsachsen vertretenen Kläranlagen eine Klärschlamm-menge von ca. 15.000 t TM/a an. Am 19.06.2020 wurde die Klärschlammmanagement Westsachsen GmbH (KMW GmbH) gegründet. Gegenstand der GmbH ist die Vorbereitung, der Bau und der Betrieb einer Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage mit einer möglichen Phosphorrückgewinnung einschließlich Energie- und Wärmerückgewinnung.

Der Betreiber der KA Görlitz-Nord zieht in Abhängigkeit des Erfolgs des VEOLIA-Demonstrationsvorhabens in Schönebeck/Elbe den Einsatz des Phosphorrückgewinnungsverfahrens PhosForce in Erwägung. Die zukünftige Entsorgung der durch ein solches Verfahren behandelten Klärschlämme durch Mitverbrennung ist in Sachsen aufgrund des Ausstiegs aus der Braunkohleverstromung langfristig nicht sichergestellt. Eine Lösung dieses Problems ist durch den angekündigten Bau eines EBS-Kraftwerks in Jänschwalde (siehe Kapitel 6.4.2) zwar in Aussicht, für dessen Umsetzung liegen allerdings noch keine Planungen vor.

Eine konkrete und in Umsetzung befindliche Planung in Sachsen ist die Errichtung der Pyrolyseanlage des Zweckverbandes Frohnbach (siehe Kapitel 5.2). Allerdings besteht dort die Unsicherheit, ob der Pyrolysekoks in den Anhang 2 der DüMV aufgenommen wird und somit die stoffliche Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehaltes realisiert werden kann.

Die Anzahl der Kläranlagen in Sachsen, deren Klärschlämme die Anforderungen für die bodenbezogene Verwertung nach § 8 AbfKlärV nicht einhalten und aus diesem Grund thermisch entsorgt werden müssen, kann derzeit nicht abgeschätzt werden. Vor allem im Erzgebirgsraum können Kläranlagenbetreiber die Klärschlämme aufgrund von Grenzwertüberschreitungen bei Schwermetallen bereits seit Novellierung des Düngerechts im Jahr 2017 nicht mehr bodenbezogen verwerten. Dies ist vor allem auf die geogene Vorbelastung der Böden mit Schwermetallen zurückzuführen. Häufig überschritten wird der Grenzwert für Cadmium. Bei nicht möglicher bodenbezogener Verwertung und Phosphorgehalten im Klärschlamm von mindestens 20 g/kg TM besteht zudem auch für diese Anlagen die Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung.

Neben den 19 Kläranlagen der GK4b und GK5 werden in Sachsen 673 Kläranlagen der GK1 bis 4a betrieben (siehe Kapitel 3.1). Allerdings entsorgen Kläranlagen der GK1 den anfallenden Klärschlamm weitgehend in größere Anlagen, so dass diese Problematik für Kläranlagen dieser Größenklasse kaum besteht.

Mit Ausnahme von vier Kläranlagen im Raum Leipzig, die in die Ausschreibung der Kommunalen Wasserwerke Leipzig GmbH einbezogen sind, sowie der im Arbeitskreis Westsachsen organisierten Kläranlagen sind keine konkreten Planungen im Freistaat Sachsen bekannt, die zukünftig für die Behandlung der in dieser Vielzahl an Kläranlagen anfallenden Klärschlämme zur Verfügung stehen werden.

Der vorbeschriebene Sachstand wird wie folgt bewertet:

- Die Verpflichtung zur P-Rückgewinnung ab 2029 bzw. 2032 ist den betroffenen Aufgabenträgern seit Bekanntgabe der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung am 02.10.2017 im Bundesgesetzblatt konkret bekannt. Die Aufgabenträger waren spätestens durch die Klärschlammkonzeption 2015 und die darin enthaltenen Handlungsempfehlungen im Hinblick auf die Einführung der P-Rückgewinnung informiert und aufgefordert, Maßnahmen einzuleiten.
- Vor diesem Hintergrund betrachtet ist die konzeptionelle Planung der zukünftigen Klärschlamm Entsorgung durch die Aufgabenträger im Hinblick auf die 2029/2032 eintretenden neuen Pflichten und Veränderungen in Sachsen insgesamt noch nicht zufriedenstellend, wobei erhebliche Unterschiede zwischen den Aufgabenträgern zu verzeichnen sind. Bisher sind nur wenige Aufgabenträger aktiv geworden.
- Positiv sind vor allem diejenigen Aktivitäten zu bewerten, die auf die Schaffung von eigenen Anlagenkapazitäten zur Phosphorrückgewinnung bzw. anderweitigen Klärschlamm Entsorgung in Sachsen im Rahmen einer Kooperation von Akteuren abzielen. Durch die Schaffung eigener Kapazitäten lässt sich für die Zukunft dauerhaft Entsorgungssicherheit schaffen.
 - Zu nennen ist insbesondere der Arbeitskreis Westsachsen, der sich mit seinen gemeinsamen Aktivitäten auf einem guten Weg befindet. Sehr positiv ist an dieser Initiative zu bewerten, dass sie in einem Zeitfenster offen für die Erweiterung der Kooperation auf weitere kommunale Aufgabenträger ist.
 - Zu erwähnen ist hierbei auch der Zweckverband Frohnbach mit seinen Aktivitäten zur Realisierung einer eigenen Pyrolyseanlage, selbst wenn hierbei noch Unsicherheiten hinsichtlich der stofflichen Verwertung des Pyrolysekokes unter Nutzung seines Phosphorgehaltes bestehen.
- Auch positiv zu erwähnen sind Aufgabenträger, die gemeinsam mit weiteren sächsischen Aufgabenträgern oder einzeln Aktivitäten zur Einführung der Phosphorrückgewinnung durch Vergabe einer Dienstleistung im Rahmen einer Ausschreibung entfaltet haben. Die Vergabe der Dienstleistung an Dritte hat gegenüber der Schaffung eigener Anlagenkapazitäten zwar den Nachteil, dass erstens bis zur Vergabeentscheidung keine Sicherheit über den Erfolg besteht. Zweitens können aus der Vergabe ökologisch nachteilige Folgen (z. B. hohe Transportemissionen durch weite Transporte) resultieren. Allerdings bietet das zeitige Voranschreiten auf diesem Weg bspw. den Vorteil, dass bei erfolglosen Ausschreibungsversuchen noch Zeit für eine Änderung der Vorgehensweise in Richtung der Schaffung eigener Kapazitäten erfolgen kann.
 - Zu erwähnen sind hier die Aufgabenträger in den Städten Dresden, Leipzig und Chemnitz.

- Ein Abwarten von zur P-Rückgewinnung verpflichteten Aufgabenträgern ohne Ergreifen konkreter Planungs- oder Vorbereitungsmaßnahmen wird als problematisch bewertet, weil diese Aufgabenträger riskieren, die gesetzliche Verpflichtung zur P-Rückgewinnung nicht/nicht rechtzeitig und/oder nur mit unvermeidbaren Auswirkungen auf die Abwassergebühren erfüllen zu können. Kritisch wird vor allem gesehen, die Phosphorrückgewinnung lediglich kurze Zeit vor dem Inkrafttreten der Pflicht an einen Dritten vergeben zu wollen. Die Entwicklung des Dienstleistungsmarktes einschließlich der Preisentwicklung kann heute nicht eingeschätzt werden.
- Als ein erhebliches Problem für die zukünftige Klärschlamm Entsorgung wird die weit verbreitete Kleinteiligkeit der Abwasserentsorgung (siehe Abbildung 1) gesehen, sofern die Klärschlämme nicht bodenbezogen verwertet werden können. Da für Aufgabenträger mit sehr geringen Klärschlamm m mengen eigene Anlagen zur Entsorgung unabhängig von einer P-Rückgewinnung ausscheiden, sind solche Aufgabenträger gezwungen, entweder ihre Klärschlämme zur Entsorgung zu vergeben oder sich anderen Aufgabenträgern anzuschließen. Die Vergabe birgt insbesondere im Hinblick auf die Unsicherheiten bezüglich verfügbarer Kapazitäten und Preise erhebliche Unsicherheiten in sich.

6.4.2 Private Entsorgungswirtschaft

Die Aktivitäten der privaten Entsorgungswirtschaft zur Entwicklung von Angeboten an die Aufgabenträger zur Erfüllung der zukünftigen Anforderungen der Klärschlamm Entsorgung sind bislang ebenfalls wenig konkret.

- In Westsachsen arbeitet ein länderübergreifender Firmenverbund, initiiert durch die Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH (bis 31.10.2019 LAV Landwirtschaftliches Verarbeitungszentrum Markranstädt GmbH), mit Partnern aus Thüringen und Sachsen-Anhalt an der Entwicklung von Verwertungskonzepten für organische Reststoffe, u. a. Klärschlämme, einschließlich der Möglichkeit zur Phosphorrückgewinnung (AbonoCARE¹⁰, Technologie- und Kompetenzzentrum organisches Reststoffrecycling (TKoR)¹¹). Durch den Zusammenschluss von LAV und TVF wurden die Kapazitäten zweier Unternehmen mit großen Anteilen am Klärschlamm Entsorgungsmarkt in Sachsen gebündelt. Der Zusammenschluss lässt eine Verbesserung der Möglichkeiten der Unternehmen zur Entwicklung von zukunftsfähigen Entsorgungslösungen für Klärschlämme in Sachsen erwarten. Über konkrete Planungen ist allerdings bislang nichts bekannt. Die Veolia Deutschland GmbH betreibt das RePhoR-Forschungsvorhaben DreiSATS (siehe Kapitel 5.2).
- Auf dem Standort des Industriegebietes Kraftwerk Jänschwalde planen die Veolia Deutschland GmbH und die LEAG die Errichtung einer Anlage zur thermischen Verwertung von Ersatzbrennstoff (EBS) aus aufbereitetem Abfall mit einem Durchsatz von 480.000 t/a von kommunalen und gewerblichen Siedlungsabfällen. Das Konzept beinhaltet die Option der Mitverbrennung von bis zu 40.000 t/a an getrocknetem Klärschlamm. Die Inbetriebnahme soll 2024 erfolgen (Veolia 2019a). Sollte dieses Projekt umgesetzt werden, bestünde die Möglichkeit zur Mitverbrennung von Klärschlamm en, die nicht der Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung unterliegen bzw. ein Phosphorrückgewinnungsverfahren durchlaufen haben. Das Projekt ist derzeit lediglich angekündigt, so dass die Umsetzungswahrscheinlichkeit nicht bewertet werden kann.

¹⁰ www.abonocare.de

¹¹ www.tkor-netzwerk.de

6.4.3 Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA)

Die DWA plant die Gründung eines Klärschlammnetzwerkes im Jahr 2020 mit dem Ziel der Vernetzung aller beteiligten Akteure aus Kommunen, Behörden, Wissenschaft, Landwirtschaft, Wirtschaft, Verbänden des Umweltbereichs. Die kommunalen Betreiber von Kläranlagen sollen bei rechtlichen, technischen und organisatorischen Fragestellungen im Klärschlammbereich unterstützt werden, um regionale Lösungsstrategien zur nachhaltigen Klärschlammverwertung zu entwickeln. Großer Wert soll dabei auf den regelmäßigen Informations- und Erfahrungsaustausch in Form von Netzwerktagen gelegt werden. Es ist vorgesehen, dass das Klärschlammnetzwerk den Mitgliedern Dokumente und Informationen in einer Datenplattform zur Verfügung stellt (Hänsel 2020). Das Klärschlammnetzwerk kann nach dem Vorbild anderer Regionen (z. B. Klärschlammnetzwerk Nord-Ost, Norddeutsches Netzwerk Klärschlamm, DWA-NRW-Forum zum Umgang mit Klärschlamm) bei der Vernetzung der Aufgabenträger eine wichtige Rolle spielen.

6.5 Einschätzung der zukünftigen Entsorgungssicherheit

Auf Basis der vorstehend erläuterten Optionen der Klärschlammverwertung sowie der derzeit bekannten Ausschreibungen und Konzeptionen lassen sich folgende Aussagen zur Entsorgungssicherheit treffen:

■ Bis einschließlich 2028:

Die aktuelle Vertragssituation zur Entsorgung der Klärschlamme ist, soweit bekannt, unterschiedlich (siehe Tabelle 18). Einige Aufgabenträger (ZWAV, Stadt Freiberg) besitzen Verträge bis Ende 2028. Zahlreiche Aufgabenträger verfügen über Verträge, die in den kommenden Jahren auslaufen. Wie z. B. die Ausschreibung des Zweckverbandes Abwasser Schlematal (Vertragslaufzeit: 2023 bis 2027 mit Verlängerungsoption bis maximal 2029), die im Januar 2020 ohne Ergebnis eingestellt wurde, zeigt, ist es derzeit schwierig, wirtschaftliche Angebote für Ausschreibungen mit eher kurzen Vertragslaufzeiten zu erzielen. Das betrifft nicht nur Sachsen, sondern seit der Verschärfung der düngerechtlichen Vorgaben das gesamte Bundesgebiet (EuWiD 2018c).

Die Verträge zur Klärschlammverwertung für die ZKA Dresden-Kaditz (ca. 12.800 t TM/a), das KW Leipzig-Rosental (ca. 10.700–13.000 t TM/a) und die ZKA Chemnitz-Heinersdorf (ca. 5.500 t TM/a) sind langfristig angelegt und bereits im Hinblick auf die aus der novellierten AbfKlärV resultierenden Verpflichtungen ausgestaltet.

Die bodenbezogene Verwertung wird in Sachsen weiterhin eine wesentliche, wenn auch zurückgehende Bedeutung aufweisen (siehe Kapitel 6.3). Einen ebenfalls wesentlichen und bis 2029 steigenden Anteil wird die Mitverbrennung in Braunkohlekraftwerken haben (siehe Kapitel 6.2.2). Da diese beiden Entsorgungsoptionen für die in Sachsen anfallenden Klärschlämme bis einschließlich 2028 weiterhin Bestand haben werden, ist das Potenzial vorhanden, die Klärschlamm Entsorgung in diesem Zeitraum sicherzustellen.

Aufgrund der in vielen Fällen nicht bis Ende 2028 reichenden Entsorgungsverträge und der Unsicherheiten im Hinblick auf die durchzuführenden Ausschreibungsverfahren, ist allerdings festzustellen, dass Entsorgungssicherheit für den Zeitraum bis einschließlich 2028 nicht gesichert ist.

■ Ab 2029:

Für den Zeitraum ab 2029, wenn die Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung umzusetzen ist, existieren derzeit noch keine konkreten Planungen, die erforderlichen Anlagenkapazitäten zu errichten. Dies betrifft sowohl die Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung als auch die private Entsorgungswirtschaft (siehe Kapitel 6.4). Auch existiert derzeit nur eine geringe Zahl an großtechnisch umgesetzten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung (siehe Kapitel 5.2). Auch Langzeitlager, die für die zwischenzeitliche Lagerung von Klärschlammmonoverbrennungssaschen genutzt werden könnten, existieren in Sachsen bislang nicht (siehe Kapitel 5.4). Mit Ausnahme der drei großen Kläranlagen in Dresden, Leipzig und Chemnitz sind bislang keine vertraglichen Beziehungen zwischen Aufgabenträgern und Entsorgern zur Klärschlammverwertung über das Jahr 2029 hinaus bekannt (siehe Kapitel 6.4).

Die Mitverbrennung in Braunkohlekraftwerken, derzeit noch der bedeutendste Entsorgungsweg für Klärschlämme in Sachsen, wird maximal bis zum 31.12.2035 zur Verfügung stehen.

Aufgrund der fehlenden Anlagenkapazitäten bzw. vertraglichen Bindungen mit bestehenden Anlagen besteht derzeit keine Entsorgungssicherheit für den Zeitraum ab 2029.

7 Handlungsempfehlungen

Nachfolgend werden Handlungsempfehlungen für die verschiedenen Akteure der Klärschlamm Entsorgung im Freistaat Sachsen aufgeführt, die aus den vorstehenden Daten und Erläuterungen des Berichtes abgeleitet wurden. Die Empfehlungen richten sich im Einzelnen an

- die Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung,
- das Sächsische Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL),
- die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger.

7.1 Grundsätzliches

Die Entsorgungspflicht für Klärschlamm aus der Abwasserbehandlung liegt bei den Betreibern der Abwasserbehandlungsanlagen bzw. den Gemeinden oder den Körperschaften des öffentlichen Rechts, denen die Aufgaben der Abwasserreinigung übertragen wurden. Die im Kapitel 1.3 beschriebenen Gesetze und das entsprechende untergesetzliche Regelwerk bilden den bei der Klärschlamm Entsorgung zu beachtenden, abschließenden Handlungsrahmen. Darüber hinaus gehende verbindliche Vorgaben des Freistaates Sachsen für Klärschlamm sind mangels einer Rechtsgrundlage nicht möglich. Der Freistaat unterstützt die Aufgabenträger mit Fach- und Sachinformationen insbesondere im Rahmen dieses Berichtes zur Klärschlamm Entsorgung. Der Bericht zur Klärschlamm Entsorgung kann keine verbindliche Vorgabe für die Aufgabenträger enthalten. Dem Freistaat obliegt für die Klärschlamm Entsorgung als kommunale Selbstverwaltungsaufgabe die Rechtsaufsicht, eine Fachaufsicht über die Aufgabenträger existiert nicht.

7.2 Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung

Während ein großer Teil der Betreiber von Kläranlagen der GK4b und 5 an Konzeptionen zur zukünftigen Klärschlamm Entsorgung arbeiten bzw. die Klärschlamm Entsorgung als Dienstleistung ausschreiben, sind entsprechende Aktivitäten seitens der Betreiber der Kläranlagen kleiner GK4b nur im Ausnahmefall festzustellen. Aus diesem Grund wird insbesondere den Betreibern der Kläranlagen kleiner GK4b empfohlen, sich rechtzeitig Klarheit darüber zu verschaffen, von welchen Verpflichtungen zur Klärschlamm Entsorgung sie betroffen sind und welche Optionen dafür zur Verfügung stehen. Dies sollte im Rahmen der Erstellung eines Klärschlamm Entsorgungskonzeptes erfolgen.

Da derzeit die Entwicklung eines funktionierenden Marktes zur Klärschlamm Entsorgung mit regional verfügbaren Entsorgungskapazitäten in ausreichendem Umfang nicht abzusehen ist, stellt „Marktbeobachtung und spätere Ausschreibung“ keine geeignete Konzeption dar, sondern führt lediglich zu Zeitverzug im Hinblick auf die anstehenden Fristen zur Phosphorrückgewinnung bzw. auf den Wegfall der derzeit intensiv genutzten Mitverbrennung in Braunkohlekraftwerken. Den Aufgabenträgern wird dringend empfohlen, die Klärschlamm Mengen durch regionale Kooperationen auf kommunaler Ebene zu bündeln und Strategien zur Phosphorrückgewinnung sowie zu anderweitiger Entsorgung im Rahmen der Klärschlamm Entsorgung gemeinsam zu entwickeln. Dabei sollten vorrangig Lösungen innerhalb Sachsens ins Auge gefasst werden, um Klärschlamm Exporte in andere Bundesländer möglichst zu vermeiden. Konkret wird empfohlen, sich den in Sachsen bestehenden Initiativen (Westsachsen oder Ostsachsen) anzuschließen oder eigene Kooperationen in Form von Zweckverbänden oder als GmbH zu gründen, welche mit konkreten Aufgaben zur Entwicklung von Konzepten zur zukünftigen Klärschlamm Entsorgung zu betrauen sind. Es sollten vor diesem Hintergrund auch gemeinsame Lösungen mit Regionalversorgern geprüft werden, um das mit der thermischen Behandlung einhergehende energiewirtschaftliche und betriebliche Know-how zu nutzen. Die Vertragslaufzeiten derzeit geplanter und zukünftiger Ausschreibungen sollten auf mögliche Kooperationsansätze angepasst werden. Auch aktuell vertraglich gebundene Klärschlamm Mengen sollten für derartige Kooperationen weiterhin berücksichtigt werden.

Aufgrund der zukünftig volatilen Verfügbarkeit der Mitverbrennungskapazitäten in Braunkohlekraftwerken wird den Aufgabenträgern empfohlen, Zwischenlagerkapazitäten aufzubauen, um die bis zur Verfügbarkeit ausreichender Kapazitäten in der Monoverbrennung auftretenden Entsorgungseingänge überbrücken zu können.

7.3 Sächsisches Staatsministerium für Energie, Klimaschutz, Umwelt und Landwirtschaft (SMEKUL)

Dem SMEKUL wird empfohlen, abfallpolitische Grundsätze zur Klärschlamm Entsorgung und daraus resultierende Schlussfolgerungen in den Abfallwirtschaftsplan aufzunehmen.

Dem SMEKUL wird außerdem empfohlen, notwendige Prozesse der Bündelung von Klärschlamm Mengen durch Kooperation der Aufgabenträger untereinander zu unterstützen und falls nötig zu initiieren bzw. zu forcieren. Im Bedarfsfall sollte erwogen werden, geeignete Dritte mit der Moderation solcher Prozesse zu beauftragen. Dafür scheint bspw. die DWA ein geeigneter Partner zu sein.

Da die in Artikel 4 der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverordnung enthaltene Berichtspflicht erst im Jahr 2024 einen Gesamtüberblick über die durchgeführten und geplanten Maßnahmen aller Aufgabenträger in Sachsen bieten kann, wird dem SMEKUL vorgeschlagen, eine entsprechende Abfrage bereits 2020/2021 durchzuführen bzw. durchführen zu lassen. Auf der Grundlage des damit erzielten Wissensstands sollte dann entschieden werden, ob bzw. welche Maßnahmen der Unterstützung der Aufgabenträger erforderlich sind.

Im Hinblick auf den Standort Lauta sollte das SMEKUL alle geeigneten Aktivitäten des RAVON zur Schaffung von Klärschlammbehandlungskapazitäten intensiv unterstützen.

7.4 Öffentlich-rechtliche Entsorgungsträger

Da die öffentlich-rechtlichen Entsorgungsträger in Sachsen überwiegend entweder keine Entsorgungsmöglichkeiten für Klärschlamm haben und ihnen bisher auch kein Klärschlamm überlassen wurde, ergeht ausschließlich an den RAVON die Empfehlung, seine Aktivitäten zur Schaffung von Behandlungskapazitäten am Standort Lauta weiter voranzutreiben, um an diesem Standort entsprechende Kapazitäten schaffen zu können.

8 Zusammenfassung

Mit Inkrafttreten der AbfKlärV am 03.10.2017 wurden abfallrechtlich die Rahmenbedingungen für die zukünftige Klärschlamm Entsorgung und Phosphorrückgewinnung gesetzt. Die Weiterentwicklung der düngerechtlichen Anforderungen, insbesondere die Anwendungsgrundsätze nach Düngeverordnung, beeinflussen die stoffliche Verwertung in der Landwirtschaft maßgeblich.

Klärschlammfall und -entsorgung im Jahr 2017

- Im Jahr 2017 betrug der Klärschlammfall aus öffentlichen Abwasserbehandlungsanlagen im Freistaat Sachsen 72.077 t TM.
- Die thermische Entsorgung der Klärschlämme hat durch das Inkrafttreten der DüV weiter zugenommen. Im Jahr 2017 wurden 49 % (34.992 t TM) der entsorgten Klärschlammengen einer thermischen Entsorgung zugeführt. Hierbei handelt es sich nahezu ausschließlich um die Mitverbrennung von Klärschlamm. Stofflich verwertet wurden 51 % der Klärschlämme, davon 34 % im Landschaftsbau und 10 % in der Landwirtschaft. Der Anteil der Klärschlämme, welche einer sonstigen stofflichen Verwertung zugeführt wurden, lag bei etwa 7 %.

Prognose der Klärschlammengen bis 2032

- Für den Zeitraum 2018 bis 2032 wird prognostiziert, dass sich die anfallende Klärschlammmenge um ca. 12 % von 69.846 t TM/a (2018) auf 61.200 t TM/a verringert. Ausschlaggebend für den Rückgang sind insbesondere technische Optimierungsmaßnahmen, aber auch die Bevölkerungsentwicklung.

Phosphorrückgewinnung

- Derzeit befinden sich nur wenige Verfahren zur Phosphorrückgewinnung im Anfangsstadium einer großtechnischen Umsetzung. Eine umfassende Beurteilung der wichtigsten derzeit in Entwicklung befindlichen Phosphorrückgewinnungsverfahren findet sich in den 22 Datenblättern des Anhangs 1 des vorliegenden Berichtes.
- Die Phosphorrückgewinnung aus der bei der Klärschlammmonoverbrennung anfallenden Asche zeichnet sich derzeit als bevorzugter Weg zur Erfüllung der Verpflichtungen aus der AbfKlärV ab. Dies resultiert vor allem daraus, dass zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. der flüssigen Phase auf der Kläranlage fast bei allen Verfahren eine Bio-P-Elimination Voraussetzung ist. Diese Voraussetzung erfüllen nur wenige Kläranlagen im Freistaat Sachsen. Weiterhin sind Verfahren, welche auf der Kläranlage zum Einsatz kommen sollen, nur für Klärschlämme mit einem geringeren P-Gehalt geeignet. Bei höheren P-Gehalten wird aufgrund der vergleichsweise geringen Rückgewinnungsraten dieser Verfahren ein P-Gehalt von 20 g/kg nicht unterschritten. In diesem Fall wäre anschließend ein weiteres Phosphorrückgewinnungsverfahren durchzuführen. Zudem gilt die 50 %-Regelung gemäß Art. 5 § 3a Abs. 1 AbfKlärV nicht für Phosphorrückgewinnungsverfahren, die vor Abschluss der Abwasser- oder Schlammbehandlung direkt auf der Kläranlage eingesetzt werden. Diese Verfahren unterliegen weiterhin dem Wasserrecht.
- Im Freistaat Sachsen wird an verschiedenen Verfahren zur Phosphorrückgewinnung gearbeitet, welche im Kapitel 5.2 beschrieben sind:
 - PARFORCE,
 - Pontes Pabuli,
 - Akkumulation und schadstoffarme Verfügbarmachung von Bio-P aus Klärschlamm,
 - Klärschlamm-Pyrolyse Niederfrohna.

Darüber hinaus gibt es mit DreiSATS (Veolia Klärschlammverwertung Deutschland GmbH) ein Forschungsvorhaben, das im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme RePhoR in der Umsetzungsphase gefördert wird.

Bislang befinden sich die genannten Vorhaben in der Entwicklung bzw. Errichtung (Klärschlamm-Pyrolyse Niederfrohna) und haben die großtechnische Eignung noch nicht nachweisen können.

- Für Produkte vieler Verfahren besteht für den Einsatz als Düngemittel die düngerechtliche Zulässigkeit aktuell nicht. Für Phosphorsäure als Produkt von Rückgewinnungsverfahren gilt dies nicht, da Phosphorsäure vielfältig eingesetzt werden kann.
- Die Kosten der Phosphorrückgewinnung können auf die Abwassergebühr umgelegt werden, sofern die Phosphorrückgewinnung den Aufgabenträgern der öffentlichen Abwasserbeseitigung aufgrund der Regelungen der AbfKlärV verpflichtend vorgeschrieben ist (SMI, 2018).

Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen im Freistaat Sachsen

- Von den als potenzielle Standorte für die Langzeitlagerung von Klärschlammmonoverbrennungsaschen betrachteten Deponien sind die Deponien Kunnersdorf und Wetro am ehesten als Langzeitlager für Klärschlammmonoverbrennungsaschen geeignet. Als Deponiestandorte mit ausreichend Erweiterungsflächen bieten sie sich als mögliche Standorte für Langzeitlager an. Alle anderen Standorte sind aufgrund eingeschränkter Planungshorizonte, höherer Kosten oder des Mangels an verfügbaren Flächen weniger oder nicht geeignet.

Zukünftige Klärschlamm Entsorgung

- In den nächsten Jahren (bis 2029/32) werden für die Entsorgung von Klärschlämmen in Sachsen insbesondere die Mitverbrennung und die Monoverbrennung eine Rolle spielen. Während die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken in Sachsen erfolgt, werden die Monoverbrennungskapazitäten gegenwärtig in anderen Bundesländern aufgebaut. Im Freistaat Sachsen sind gegenwärtig keine Aktivitäten zur Errichtung von Klärschlammmonoverbrennungsanlagen bekannt. Der landschaftsbaulichen Verwertung wird eine abnehmende Bedeutung zukommen. Die landwirtschaftliche Verwertung wird nur noch geringe Bedeutung haben. Zahlreiche Verträge der Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung zur Klärschlamm Entsorgung enden in den kommenden Jahren.
- Nach Inkrafttreten der Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung in 2029/32 wird die Mitverbrennung nur noch eine geringe Rolle spielen. Auch die landschaftsbauliche Verwertung wird weiterhin rückläufig sein. Der Bedarf an Monoverbrennungskapazitäten wird auf bis zu 90 % der im Freistaat Sachsen anfallenden Klärschlämme (Gesamtklärschlammfall abzüglich schätzungsweise 10 % auch zukünftig mögliche bodenbezogene Verwertung) steigen. Da ab 2029 durch den Wegfall der Mitverbrennung nach gegenwärtigen Stand der Planungen bundesweit nicht mit Überkapazitäten bei der Klärschlammmonoverbrennung zu rechnen ist, ist eine Verbringung in andere Bundesländer durch Ausschreibung mit Unsicherheiten bei der Höhe der Entsorgungskosten und hohen Kosten aufgrund langer Transportwege verbunden. Zur Vermeidung regionaler Unterkapazitäten an Klärschlammmonoverbrennungsanlagen besteht im Freistaat auch vor dem Hintergrund des verfügbaren Zeitrahmens zur Planung, Genehmigung und Errichtung erforderlicher Anlagen akuter Handlungsbedarf.

Vorhaben der Akteure zur zukünftigen Klärschlamm Entsorgung im Freistaat Sachsen

- Die Aufgabenträger mit den größten Kläranlagen (Dresden, Leipzig, Chemnitz) haben die Entsorgung der Klärschlämme sowie die Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung als Dienstleistung beauftragt. Ein Verbund von vier Aufgabenträgern (Arbeitskreis Westsachsen) plant eine Eigenlösung zur zukünftigen Klärschlamm Entsorgung und Phosphorrückgewinnung. Ein Kläranlagenbetreiber (Görlitz-Nord) zieht die Rückgewinnung des Phosphors durch ein auf der Kläranlage betriebenes Verfahren in Erwägung.
- Die Veolia Deutschland GmbH und die LEAG planen für 2024 am Standort Jänschwalde die Inbetriebnahme eines EBS-Kraftwerks, in dem auch die Mitverbrennung von bis zu 40.000 t/a an getrocknetem Klärschlamm möglich sein soll.

- Weitere Konzeptionen bzw. Planungen sind derzeit nicht bekannt. Neben dem vermeintlich langen Zeitraum bis zur Umsetzung der Phosphorrückgewinnung in 2029/32 sind es vor allem die bislang überwiegend erst in Entwicklung befindlichen Phosphorrückgewinnungsverfahren und wenig konkrete Angaben zu deren Wirtschaftlichkeit, die konkrete Planungsschritte hemmen. Mit Ausnahme der Initiativen in Westsachsen und Ostsachsen existieren keine Zusammenschlüsse zur gemeinschaftlichen Erarbeitung von Klärschlammverwertungskonzepten. Der Zusammenschluss kleinerer Aufgabenträger ist vor dem Hintergrund der anstehenden Aufgaben jedoch notwendig.
- Am Standort der Abfallverbrennungsanlage T.A. Lauta besteht das Potenzial zur Errichtung einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage. Im Falle ihrer Errichtung bestünden dann Synergien mit der bereits in Betrieb befindlichen Abfallverbrennungsanlage (Toedter, 2018).
- Die DWA plant die Gründung eines Klärschlammnetzwerkes im Jahr 2020, welches den Aufgabenträgern ein Netzwerk und Informationen zur Verfügung stellen soll.

Einschätzung der zukünftigen Entsorgungssicherheit

- Für den Zeitraum vor 2029/32 verfügen nur wenige Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung über Entsorgungsverträge, die den gesamten Zeitraum umfassen. Für den Zeitraum nach Inkrafttreten der Verpflichtung zur Phosphorrückgewinnung in 2029/32 hat bislang mit Ausnahme der Betreiber der drei größten Kläranlagen in Dresden, Leipzig und Chemnitz kein Aufgabenträger einen Entsorgungsvertrag abgeschlossen. Entsprechende Entsorgungskapazitäten bestehen im Freistaat Sachsen ebenfalls nicht. Vor diesem Hintergrund ist derzeit weder für den Zeitraum vor 2029/32 noch danach Entsorgungssicherheit gegeben.

Handlungsempfehlungen

- Die Handlungsempfehlungen zielen insbesondere darauf ab, dass die Aufgabenträger der öffentlichen Abwasserbeseitigung eigenverantwortlich ihren Verpflichtungen zur Umsetzung der Vorgaben der AbfKlärV nachkommen müssen. Der Freistaat Sachsen kann nur unterstützend und moderierend tätig werden sowie die abfallpolitischen Grundsätze in den Abfallwirtschaftsplan aufnehmen. Dem RAVON als öRE wird empfohlen, die Aktivitäten zur Errichtung einer Klärschlammmonoverbrennungsanlage fortzuführen und diese mit einem geeigneten Phosphorrückgewinnungsverfahren zu ergänzen.

Literaturverzeichnis

- ADAM, C.; KRÜGER, O. (2013): Wertstoffpotential in deutschen Klärschlammaschen. In: Energie aus Abfall, Band 10, S. 997–1014, TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin, 2013
- ADAM, C. (2018): Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm. In: Verwertung von Klärschlamm. Tagungsband Berliner Klärschlammkonferenz, 5.-6. November 2018, Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN: 978-3-944310-43-5
- ARTHEN, A. U. MÜLLER, U. (2017): Aktuelle Entwicklungen zur Phosphorrückgewinnung. Vortrag im Rahmen des simul+Forum „Phosphorrückgewinnung aus Abfällen, insbesondere kommunalen Klärschlämmen“ am 07.04.2017. [<https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/02.pdf>], Zugriff: 17.10.2019
- AWEL – AMT FÜR ABFALL, WASSER, ENERGIE UND LUFT, BAUDIREKTION DES KANTONS ZÜRICH (2017): Phosphor-Mining: Die Zielvorgaben lassen sich erfüllen. (Projektblatt Nr. 5, April 2017). [https://phosphorusplatform.eu/images/download/AWEL_Phosphor_Nr_5_German.pdf], Zugriff: 10.09.2018
- AWEL – AMT FÜR ABFALL, WASSER, ENERGIE UND LUFT, BAUDIREKTION DES KANTONS ZÜRICH (2018): Die Umsetzung des Phosphor-Minings bedingt Kooperation. (Projektblatt Nr. 6, August 2018) [https://awel.zh.ch/internet/audirektion/awel/de/abfall_rohstoffe_altlasten/rohstoffe/rohstoffe_aus_abfaellen/n_aehrstoffe/_jcr_content/contentPar/downloadlist_2/downloaditems/projektblatt_nr_6_di.spooler.download.1533887328752.pdf/projektblatt_phosphor_klaerschlammasche_nr_6.pdf], Zugriff: 10.09.2018
- BARTELT, TH. (2020): schriftl. Mitteilung. e-Mail vom 30.06.2020
- BEIER, M.; SCHNEIDER, Y. U. M. LOREK (2016): Potential und Grenzen der Phosphorrückgewinnung für Kläranlagen mit biologischer Phosphorelimination in Niedersachsen. [<https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/114107>], Zugriff: 19.06.2020
- BERTAU, M.; FRÖHLICH, P.; GELLERMANN, C.; MAURER, A.; VOHRER, U.; WENDLER, K.: Phosphatrückgewinnung – Statuspapier der ProcessNet-Fachgruppe „Rohstoffe“. [https://dechema.de/dechema_media/Downloads/Positionspapiere/Statuspap_Phosphat_2017_FINAL_NOV-p-20003290.pdf], Zugriff: 12.11.2018
- BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2013): njnjjPhosphat – Mineralischer Rohstoff und unverzichtbarer Nährstoff für die Ernährungssicherheit weltweit. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarbeit/Politikberatung_SV_MER/Downloads/phosphat.pdf?__blob=publicationFile&v=4], Zugriff: 22.11.2018
- BGR – BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2014): Phosphat – Rohstoffwirtschaftliche Steckbriefe. [http://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Downloads/rohstoffsteckbrief_phosphat2014.pdf?__blob=publicationFile&v=2], Zugriff: 22.11.2018
- BMEL (2019): Besserer Schutz des Grundwassers vor Nitrateinträgen durch passgenaue Lösungen - Unterstützungsprogramme für die Landwirtschaft, Pressemitteilung Nr. 125 vom 14.06.2019. [<https://www.bmel.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/2019/125-Duengeverordnung.html>], Zugriff: 26.08.2019
- BMEL (2020): Verordnung zur Änderung der Düngeverordnung und anderer Vorschriften, Bundesrat-Drucksache 98/20 vom 20.02.2020. [https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2020/0001-0100/98-20.pdf?__blob=publicationFile&v=2], Zugriff: 11.03.2020
- BMWi (2020): Stilllegungspfad Braunkohle, Stand 15.01.2020 [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stilllegungspfad-braunkohle.pdf?__blob=publicationFile&v=12], Zugriff: 23.01.2020
- BHASIN, A. (2017): Recovery of Phosphorus from Incineration of Sewage Sludge. [<https://pdfs.semanticscholar.org/393f/3f05fb5aabfdb8147f4a84334b4044ba1d09.pdf>], Zugriff: 11.09.2018
- BROOKMAN, H., F. GIEVERS, V. ZELINSKI, J. OHLERT U. A. LOEWEN (2018): Influence of Hydrothermal Carbonization on Composition, Formation and Elimination of Biphenyls, Dioxins and Furans in Sewage Sludge. [<https://doi.org/10.3390/en11061582>], Zugriff: 23.06.2020
- BUDENHEIM - CHEMISCHE FABRIK BUDENHEIM KG (2018): ExtraPhos - Innovatives Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm. [https://prueck-bw.de/cms/content/media/1.3.3.0_10.2Dr.Rainer_Schnee-ExtraPhos-Verfahren-Rueckgewinnung_von_Phosphor-Praxiserfahrungen.pdf]. Zugriff: 03.09.2018
- BUNDESRAT (2019): Entschließung des Bundesrates zur Einschränkung von Mikroplastikeinträgen und zum Verbot von Mikroplastik in Kosmetika, Beschluss des Bundesrates vom 15.03.2019, Drucksache 22/19 (Grunddr. 22/19 und 73/19) [[https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2019/0001-0100/22-19\(B\).pdf?__blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesrat.de/SharedDocs/drucksachen/2019/0001-0100/22-19(B).pdf?__blob=publicationFile&v=1)], Zugriff: 02.06.2019
- BUNDESTAG (2017): Verordnung der Bundesregierung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung. BT-DRS 18/10884. S. 223 [<http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/18/108/1810884.pdf>]. Zugriff: 18.06.2020

- BUNTHOFF, T. (2019): Monoverbrennung und Phosphorrückgewinnung im Chemiepark Bitterfeld-Wolfen. Vortrag im Rahmen der 47. Berliner Wasserwerkstatt, Kolloquium des Kompetenzzentrums Wasser Berlin [https://www.kompetenz-wasser.de/wp-content/uploads/2019/04/ww47_gelsenwasser_bunthoff.pdf], Zugriff: 13.03.2020
- BUTTMANN, M. (2018): TerraNova®Ultra-Verfahren zur Klärschlamm-Trocknung mit Phosphor-Rückgewinnung. In: Verwertung von Klärschlamm. Tagungsband Berliner Klärschlammkonferenz, 5.-6. November 2018, Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN: 978-3-944310-43-5
- BUTTMANN, M. (2018a): telefonische Mitteilung Herr Marc Buttman, Geschäftsführer TerraNova Energy GmbH, am 22.11.2018
- CNP – TECHNOLOGY WATER AND BIOSOLIDS GMBH (2016): Phosphorrückgewinnung aus Abwasser – Praxiserfahrungen mit dem AirPrex®-Verfahren [http://www.thermolyphos.de/wp-content/uploads/2016/11/2-4-AirPrex_Thermolyphos.pdf], Zugriff: 24.08.2018
- CNP – TECHNOLOGY WATER AND BIOSOLIDS GMBH (2019): Auftrag für eine mobile Versuchsanlage zur Phosphorrückgewinnung. [<https://cnp-cycles.de/news/top-themen/tu-freiberg/>], Zugriff: 07.03.2018
- DBU (2010): Metallurgisches Phosphor-Recycling aus Klärschlämmen und Filterstäuben als Voraussetzung für die wirtschaftliche Erzeugung eines hochwertigen Phosphor-Düngemittels aus Abfällen [https://www.dbu.de/projekt_24557/01_db_2848.html], Zugriff: 25.05.2019
- DBU (2018): On-demand Produktion von Phosphatdünger aus Reststoffen von Brauerei und Kläranlage [https://www.dbu.de/projekt_33960/01_db_2848.html], Zugriff: 25.05.2019
- DBU (2019): Entwicklung eines effizienten P-Recyclingverfahrens mit Schwermetallabtrennung [https://www.dbu.de/projekt_34867/01_db_2848.html], Zugriff: 25.05.2019
- DESTATIS – STATISTISCHES BUNDESAMT (2018): Produzierendes Gewerbe - Düngemittelversorgung - Wirtschaftsjahr 2016/2017 (Fachserie 4, Reihe 8.2, 2017/2018). [https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Industrie-Verarbeitendes-Gewerbe/Publikationen/Downloads-Fachstatistiken/duengemittelversorgung-jahr-2040820187004.pdf?__blob=publicationFile&v=4], Zugriff: 17.04.2019
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2017): Aus der Reihe DPP vor Ort: Bericht zum Besuch bei der TetraPhos®-Pilotanlage auf dem Klärwerk Hamburg Köhlbrandhöft. [<https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/vor-ort-tetraphos/>], Zugriff: 20.08.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018): P-RoC. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_P-Roc.pdf], Zugriff: 07.11.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018a): Pearl-Verfahren. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_Ostara_Pearl.pdf], Zugriff: 07.11.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018b): EuPhoRe®. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_EuPhoRe.pdf], Zugriff: 07.11.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018c): KRN-Mephrec. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_EuPhoRe.pdf], Zugriff: 08.11.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018d): PYREG. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_PYREG.pdf], Zugriff: 08.11.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018e): Stuttgarter Verfahren +. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_Stuttgarter_Verfahren.pdf], Zugriff: 08.11.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018f): MSE-Phosphor-Rückgewinnungsanlage. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_MSE.pdf], Zugriff: 08.11.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018g): TerraNova. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_TerraNova.pdf], Zugriff: 08.11.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018h): AshDec. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_AshDec.pdf], Zugriff: 21.08.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018i): Ash2Phos. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_Ash2Phos.pdf], Zugriff: 10.09.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2018j): Verfahren zur Phosphorrückgewinnung – nach der Kläranlage – P-bac. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2018/06/Kennblatt_P-bac.pdf], Zugriff: 21.08.2018
- DPP – DEUTSCHE PHOSPHOR-PLATTFORM E.V (2019): Verfahren zur Phosphorrückgewinnung – auf der Kläranlage – PhosForce. [https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/wp-content/uploads/2019/01/Kennblatt_PhosForce.pdf], Zugriff: 21.03.2019
- DÜNGG: Düngegesetz vom 9. Januar 2009 (BGBl. I S. 54, 136), das zuletzt durch Art. 1 des Gesetzes vom 5. Mai 2017 (BGBl. I S. 1068) geändert worden ist

- DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E. V. (2014): Wirtschaftsdaten der Abwasserbeseitigung Ausgabe 2014. [https://de.dwa.de/files/_media/content/03_THEMEN/Wirtschaft/DWA_Wirtschaftsdaten_2013_fin.pdf], Zugriff: 03.05.2019
- DWA-ARBEITSGRUPPE KEK-1.5 (2018): Auswirkungen der neuen Klärschlammverordnung auf die Klärschlamm Entsorgung - Erster Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.5, Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2018 (65), Nr. 8, S. 703-709
- EASYMINING SWEDEN AB (2018): Ash2@Phos [<http://www.easymining.se/our-technologies/ash2phos/ash2phos-information/>], Zugriff: 11.09.2018
- EEW (2019): Energie.Zukunft.Stapelfeld., Vortragsfolien zur 2. Informationsveranstaltung Stapelfeld am 15. März 2019. [<https://www.energie-zukunft-stapelfeld.de/>], Zugriff: 25.05.2019
- EGLER, L.; RECHBERGER, H. U. M. ZESSNER (2014): Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser. [https://iwr.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-wasserguete/Projekte/Phosphor/Phosphorrueckgewinnung_aus_dem_Abwasser_Endbericht_6.3.14.pdf], Zugriff: 04.09.2018
- ESCHMENT (2020): schriftl. Mitteilung Herr Jürgen Eschment (PARFORCE Engineering & Consulting GmbH) am 26.01.2020
- EUWID RECYCLING UND ENTSORGUNG (2018): RP Darmstadt genehmigt Verbrennung von 100.000 Tonnen Klärschlamm in Offenbach. In: Ausgabe 46, 13.11.2018, Jahrgang 28
- EUWID RECYCLING UND ENTSORGUNG (2018c): Entsorgungsengpässe bei Klärschlamm: BMU sieht keinen rechtlichen Änderungsbedarf. In: Ausgabe 36, 04.09.2018, Jahrgang 28
- EUWID RECYCLING UND ENTSORGUNG (2019): Bundesregierung schlägt Brüssel weitere Anpassungen der Düngeverordnung vor. In: Ausgabe 35, 27.08.2019, Jahrgang 29
- EUWID RECYCLING UND ENTSORGUNG (2019a): Klärschlammverordnung: Vollzugshilfe soll im ersten Halbjahr 2020 kommen. In: Ausgabe 21, 21.05.2019, Jahrgang 29
- EUWID RECYCLING UND ENTSORGUNG (2019b): Hohe Preise und wenig Kapazitäten: „Der Markt ist gerade erst dabei, sich zu finden“. In: Ausgabe 40, 01.10.2019, Jahrgang 29
- EUWID RECYCLING UND ENTSORGUNG (2020): Düngeverordnung ist im Bundesrat. In: Ausgabe 10, 03.03.2020, Jahrgang 30
- EUWID NEUE ENERGIE (2020a): Wiese Umwelt Service plant Klärschlamm-Monoverbrennung. In: Ausgabe 6. 05.02.2020, Jahrgang 13
- EUWID WASSER UND ABWASSER (2018a): Abwasserzweckverband Mittlere Mulde testet P-Rückgewinnung mit Bierhefe. [<https://www.euwid-wasser.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/abwasserzweckverband-mittlere-mulde-testet-p-rueckgewinnung-mit-bierhefe.html>], Zugriff: 25.05.2019
- EUWID WASSER UND ABWASSER (2018b): Phosphorrückgewinnung: Gelsenwasser und EasyMining starten Partnerschaft. [<https://www.euwid-wasser.de/news/wirtschaft/einzelansicht/Artikel/phosphorrueckgewinnung-gelsenwasser-und-easymining-starten-partnerschaft.html>], Zugriff: 23.10.2018
- FEHRENBACH, H. U. J. REINHARDT (2011): Ökobilanzielle Bewertung der in der Förderinitiative entwickelten Verfahren. In: Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland. [https://www.phosphorrecycling.eu/index.php/en/publications/schlussberichte/73-abschlussbericht-phobe/Abschlussbericht_Phobe.pdf], Zugriff: 16.05.2019
- FLESKE, M. (2018): Seraplant kommt nicht nach Genthin. [<https://www.volksstimme.de/lokal/genthin/industri-seraplant-kommt-nicht-nach-genthin>], Zugriff: 12.11.2018
- FRAUNHOFER-ISC – FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SILICATFORSCHUNG (2017): Vom Phosphorzyklus zum intelligenten langzeitverfügbaren Düngemittel – Projektstart (Presseinformation / 16.1.2017). [<https://www.isc.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/vom-phosphorzyklus-zum-intelligenten-langzeitveruegbaren.html>]. Zugriff: 21.08.2018
- FRÖHLICH, P.; HOFFMANN, B. (2018): PARFORCE – Ein innovatives Verfahren zur Phosphorrückgewinnung. [https://www.recovery-worldwide.com/de/artikel/parforce-ein-innovatives-verfahren-zur-phosphor-rueckgewinnung_3187762.html], Zugriff: 13.11.2018
- FRÖHLICH, P.; ESCHMENT, J.; MARTIN, G.; LOHMEIER, R.; BERTAU, M.: The PARFORCE-Technology (Germany). In: Phosphorus: Polluter and Resource of the Future – Removal and Recovery from Wastewater, IWA Publishing, London 2018
- GKW (o. J.): Klärschlammbehandlung. [<http://www.gkw-bitterfeld-wolfen.de/index.php?id=5>], Zugriff: 17.03.2020
- GRAUMÜLLER, S. (2019): mdl. Mitteilung Frau Sabine Graumüller, LAV Markranstädt, am 07.06.2019
- HÄNSEL, K. (2020): schriftl. Mitteilung Frau Katrin Hänsel, Geschäftsführerin DWA-Landesverband Sachsen/Thüringen, am 31.01.2020

- HEIDRICH, O. (2019): Erste Betriebserfahrungen der thermischen Klärschlammverwertungsanlage auf Rügen. Vortrag im Rahmen der DWA-Klärschlammstage am 23.05.2019 in Würzburg
- HERMANN, L. (2009): Rückgewinnung von Phosphor aus der Abwasserreinigung – Eine Bestandsaufnahme. [<https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/abfall/publikationen-studien/publikationen/rueckgewinnung-phosphor-abwasserreinigung.html>], Zugriff: 05.09.2018
- HILBER, I.; BLUM, F.; LEIFELD, J.; SCHMIDT, H.-P. U. D. BUCHELI (2012): Quantitative Determination of PAHs in Biochar: A Prerequisite to Ensure its Quality and Safe Application. J. Agric. Food Chem. 60. 2042-3050. In: Appel, Th. u. K. Friedrich (2017): Phosphor-Recycling mit Karbonisaten aus Klärschlamm. TH Bingen. Schriftenreihe des Hermann-Hoepke-Instituts, Band 1. [<https://www.th-bingen.de/fileadmin/aktuelles/Infomaterial/170131-thb-hhi-schriftenreihe-p-recycling.pdf>]. Zugriff: 29.06.2020
- HMUKLV (HESSISCHES MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMASCHUTZ, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ) (2018): Hinweise zur Phosphorrückgewinnung in Hessen. [https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/hinweise_zur_p-rueckgewinnung_stand_25062018.pdf]. Zugriff: 20.10.2019
- HOFMANN, A. (2018): mdl. Mitteilung Herr Andreas Hofmann, OEWA Wasser und Abwasser GmbH, im Rahmen des 3. Arbeitskreistreffen Kreislaufwirtschaft der CLEANTECH Initiative Ostdeutschland am 18.10.2018 in Magdeburg
- HOMANN, L. U. S. KAPPA (2019): Perspektive der Klärschlamm-Mitverbrennung in Braun- und Steinkohlekraftwerken am Beispiel der Energieunternehmen EnBW und LEAG – Anforderungen und Rahmenbedingungen. Vortrag auf den 11. DWA-Klärschlammtagen am 23.05.2019 in Würzburg
- IAT – INGENIEURBERATUNG GMBH: (2014): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm (Machbarkeitsstudie). [https://www.dwa-bw.de/files/_media/content/PDFs/LV_Baden-Wuerttemberg/Homepage/BW-Dokumente/Homepage%202013/Service/Fachdatenbank/Machbarkeitsstudie_Rueckgewinnung_von_Phosphor_aus_Klaerschlamm.pdf]. Zugriff: 24.08.2018
- JENTZSCH, D. (2019): mdl. Mitteilung Herr Daniel Jentzsch, Fachbereichsleiter Klärwerk Rosental (Kommunale Wasserwerke Leipzig GmbH), am 11.06.2019
- KABBE, C. (2018): mdl. Mitteilung Herr Christian Kabbe, Deutsche Phosphor Plattform DPP e.V., im Rahmen der Berliner Klärschlammkonferenz 2018
- KIT – KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE (2013): Phosphorrückgewinnung aus Abwasser (ProPhos). [http://www.cmm.kit.edu/297_325.php], Zugriff: 21.08.2018
- KLOSE, S. (2018): mdl. Mitteilung Herr Siegfried Klose, Klose GmbH, im Rahmen der Berliner Klärschlammkonferenz 2018
- KRAUS, F., SEIS, W. (2015): P-REX: D 9.1 Quantitative risk assessment of potential hazards for humans and the environment: quantification of potential hazards resulting from agricultural use of the manufactured fertilizers
- KRAUS, F., ZAMZOW, M., CONZELMANN, L., REMY, CH., KLEYBÖCKER, A., SEIS, W., MIEHE, U., HERMANN, L., HERMANN, R. U. CH. KABBE (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_13-2019_phorwaerts.pdf]. Zugriff: 18.04.2019
- KRN-MEPHREC (2013): Klärschlammverwertung Region Nürnberg - Klärschlamm zu Energie, Dünger und Eisen mit metallurgischem Phosphorrecycling in einem Verfahrensschritt (KRN-Mephrec). [https://www.nuernberg.de/imperia/md/klaerschlammverwertung/dokumente/p140822_krn_mephrec_poster_kickoff.pdf], Zugriff: 21.08.2018
- KRN-MEPHREC (2018): Klärschlammverwertung Region Nürnberg - Klärschlamm zu Energie, Dünger und Eisen mit metallurgischem Phosphorrecycling in einem Verfahrensschritt (KRN-Mephrec). [https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/20180425_krn-mephrec_abschlussbericht_online.pdf], Zugriff: 20.08.2018
- LAGA (2015): Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung. Abschlussbericht der LAGA Ad-hoc-AG (Juli 2015). [https://www.laga-online.de/documents/2015-07_1503989850.pdf], Zugriff: 24.10.2019
- LAGA (2020): Vollzugshinweise zur Umsetzung der Klärschlammverordnung, ATA-Ad-hoc-Ausschuss, Stand: 10.02.2020. [https://www.laga-online.de/documents/laga-m-39-vollzugshinweise-zur-klaerschlammverordnung_stand-10-02-2020-_red_1591175756.pdf] sowie Anhang [https://www.laga-online.de/documents/2018_10_31_berichtspflicht_von_klaerschlammherzeugern_nach_paragraph_3a_abklaerv_1591176050.xlsx], Zugriff: 24.06.2020]
- LANGENOHL, TH. (2019): Entsorgungskapazitäten in Deutschland - Ein Überblick -, Vortrag auf der Netzwerktagung des Klärschlammnetzwerkes Nord-Ost in Berlin am 23.01.2019
- LEIDOLPH, L. (2019): Phosphorrückgewinnung mit dem pontes pabuli-Verfahren: Rückgewinnung aus Aschen - Ein innovatives Verfahren aus Sachsen (Leipzig). Vortrag auf der DGAW-Regionalveranstaltung Ost „Die Zukunft der Klärschlammverwertung in Brandenburg“ am 19.06.2019 in Neuruppin

- LFU – BAYRISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT (HRSG.) (2015): Rückholbarkeit von Phosphor aus kommunalen Klärschlämmen – Abschlussbericht.
[[LFULG \(2013\): Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft im Freistaat Sachsen - Aufbringungsplan 2012, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung 7 Pflanzliche Erzeugung, Juli 2013

LFULG \(2014\): Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft im Freistaat Sachsen - Aufbringungsplan 2013, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung 7 Pflanzliche Erzeugung, April 2014

LFULG \(2015\): Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft im Freistaat Sachsen - Aufbringungsplan 2014, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung 7 Pflanzliche Erzeugung, März 2015

LFULG \(2016\): Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft im Freistaat Sachsen - Aufbringungsplan 2015, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung 7 Pflanzliche Erzeugung, Februar 2016

LFULG \(2017\): Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft im Freistaat Sachsen - Aufbringungsplan 2016, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung 7 Pflanzliche Erzeugung, Februar 2017

LFULG \(2018\): Nitrat-Gebiete nach SächsDüReVO
\[\[https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Nitrat_Gebiete_nach_SaechsDueReVO.pdf\]\(https://www.landwirtschaft.sachsen.de/download/Nitrat_Gebiete_nach_SaechsDueReVO.pdf\)\], Zugriff: 27.05.2019

LFULG \(2018a\): Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft im Freistaat Sachsen - Aufbringungsplan 2017, Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Abteilung 7 Pflanzliche Erzeugung, März 2018

LFULG \(2019\): Nährstoffgehalte von Klärschlämmen mit Verwertung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen in Sachsen \(ausgewählte, repräsentative Kläranlagen nach Größenklassen\); interne Mitteilung

LI, Y., Y. ZHAI, Y. ZHU, C. PENG, T. WANG, G. ZENG, D. WU U. X. ZHAO \(2017\): Distribution and Conversion of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons during the Hydrothermal Treatment of Sewage Sludge.
\[<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b01523>\], Zugriff 23.06.2020

LIU, T., Y. GUO, N. PENG, Q. LANG, Y. XIA, C. GAI, Q. ZHENG U. Z. LIU \(2018\): Identification and quantification of polycyclic aromatic hydrocarbons generated during pyrolysis of sewage sludge: Effect of hydrothermal carbonization pretreatment. \[<https://doi.org/10.1016/j.jaap.2018.01.021>\], Zugriff 23.06.2020

LLH \(2018\): Neue Düngeverordnung - Die wichtigsten Neuerungen, Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen.
\[<http://cdn.llh-hessen.de/pflanze/boden-und-duengung/duengeverordnung/duengebedarfsermittlung-fruehjahr-2018/02%20Zusammenfassung%20DuengeVO%20lang%20180130.pdf>\], Zugriff: 28.05.2019

LÖWE, H. \(2019\): Die BMBF-Fördermaßnahme Regionales Phosphor-Recycling \(RePhoR\). Tagungsband „Verwertung von Klärschlamm 2“. Hrsg.: Holm, O.; Thomé-Kozmiensky, E.; Quicker, P. u. St. Kopp-Assemacher. S. 339-346

LVZ – LEIPZIGER VOLKSZEITUNG \(2019\): Leipzigs will neues Gas-Kraftwerk bauen – die Pläne im Detail. Meldung vom 05.07.2019. \[<https://www.lvz.de/Leipzig/Lokales/Leipzigs-will-neues-Gas-Kraftwerk-bauen-die-Plaene-im-Detail>\], Zugriff: 28.08.2019

MEDIENSERVICE SACHSEN \(2018\): 1. Spatenstich für Erweiterung der Kläranlage Penig. Pressemitteilung vom 29.10.2018, \[<https://www.medien-service.sachsen.de/medien/news/221471>\], Zugriff: 29.08.2019

MINTENIG, S.; INT-VEEN, I.; LÖDER, M. U. G. GERDTS \(2014\): Mikroplastik in ausgewählten Kläranlagen des Oldenburgisch-Ostfriesischen Wasserverbandes \(OOWV\) in Niedersachsen - Probenanalyse mittels Mikro-FTIR-Spektroskopie.
\[\[https://www.oowv.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Abschlussbericht_Mikroplastik_in_Klaeranlagen-3.pdf\]\(https://www.oowv.de/fileadmin/_migrated/content_uploads/Abschlussbericht_Mikroplastik_in_Klaeranlagen-3.pdf\)\], Zugriff: 02.06.2019

MONTAG, D. \(2008\): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserreinigung – Entwicklung eines Verfahrens zur Integration in kommunale Kläranlagen. \[\[http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2008/2298/pdf/Montag_David.pdf\]\(http://darwin.bth.rwth-aachen.de/opus3/volltexte/2008/2298/pdf/Montag_David.pdf\)\], Zugriff: 04.09.2018

MONTAG, D.; EVERDING, W.; MALMS, S.; PINNEKAMP, J.; REINHARDT, J.; FEHRENBACH, H.; ARNOLD, U.; TRIMBORN, M.; GOLDBACH, H.; KLETT, W. U. TH. LAMMERS \(2015\): Bewertung konkreter Maßnahmen einer weitergehenden Phosphorrückgewinnung aus relevanten Stoffströmen sowie zum effizienten Phosphoreinsatz. UBA-Texte 98/2015
\[\[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_98_2015_bewertung_konkreter_massnahmen_einer_weitergehenden_phosphorrueckgewinnung.pdf\]\(https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/378/publikationen/texte_98_2015_bewertung_konkreter_massnahmen_einer_weitergehenden_phosphorrueckgewinnung.pdf\)\]. Zugriff: 21.08.2018](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000008?SID=732567526&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27lfu_abfall_00221%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27))

- MORF (2018): Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad. [https://www.vsa.ch/fileadmin/user_upload/Public/18_05_20_VTMA_Schlussbericht_End.pdf], Zugriff: 10.09.2018
- MÜLLER, S. U. S. GÜNTHER (2017): Akkumulation und schadstoffarme Verfügbarmachung von Bio-P aus Klärschlamm. Endbericht [<https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-32062.pdf>], Zugriff: 25.05.2019
- NÄTTORP, A. U. K. REMMEN (2015): Sustainable sewage sludge management fostering phosphorus recovery and energy efficiency. Deliverable D10.1 of the European P-REX project. [<https://zenodo.org/record/242550/preview/P-REX%20D10.1%20Report%20on%20LCC%20of%20European%20P%20recovery%20processes.pdf>], Zugriff: 03.05.2019
- NURESys (2015): References. [<https://phosphorusplatform.eu/images/Conference/ESPC2-materials/Dewaele%20-%20NuReSys%20From%20P%20recovery%20to%20fertilizer%20production.pdf>], Zugriff: 24.08.2018
- OBA (2018): Betriebsaufsicht (Anzahl Betriebe, Stand: 31. Dezember 2017). [<http://www.oba.sachsen.de/278.htm>], Zugriff: 20.05.2019
- OSTARA - OSTARA NUTRIENT RECOVERY TECHNOLOGIES INC. (O. J.): Technology - Pearl®. [<http://ostara.com/nutrient-management-solutions/>], Zugriff: 21.08.2018
- PARFORCE (2018): Webseite der PARFORCE Engineering & Consulting GmbH [<http://www.parforce-technologie.de/>], Zugriff: 25.05.2019
- PENG, N., Y. LI, T. LIU, Q. LANG, C. GAI U. Z. LIU (2017): Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Toxic Heavy Metals in Municipal Solid Waste and Corresponding Hydrochars. [<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b02964>], Zugriff: 23.06.2020
- PFEFFERKORN, CH.; WUSTMANN, F. U. G. SCHOLICH (2015): Konzeption zur Entsorgung von Abfällen aus der kommunalen Abwasserbehandlung im Freistaat Sachsen, Fortschreibung 2015 (Klärschlammkonzeption 2015). Hrsg.: Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG) [<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/25481/documents/35697>], Zugriff: 29.08.2019
- PLANK, H. (2018): Genehmigungsrechtliche Aspekte für die Klärschlammverwertung am Standort Halle-Lochau. In: Verwertung von Klärschlamm. Tagungsband Berliner Klärschlammkonferenz, 5.-6. November 2018, Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN: 978-3-944310-43-5
- PICON (2020): schriftliche Mitteilung Christel Pfefferkorn, e-Mail vom 20.02.2020
- PINNEKAMP, J., EVERDING, W., GETHKE, K., MONTAG, D., WEINFURTNER, K., SARTORIUS, C., VON HORN, J., TETTENBORN, F., GÄTH, S., WAIDA, C., FEHRENBACH, H., REINHARDT, J., (2011): Phosphorrecycling – Ökologische und wirtschaftliche Bewertung verschiedener Verfahren und Entwicklung eines strategischen Verwertungskonzepts für Deutschland (PhoBe). [https://www.phosphorrecycling.eu/index.php/en/publications/schlussberichte/73-abschlussbericht-phobe/Abschlussbericht_Phobe.pdf], Zugriff: 02.05.2019
- PINNEKAMP, J.; GETHKE, K., MONTAG, D. (2005): Stand der Forschung zur Phosphorrückgewinnung. In: Pinnekamp, J. (Hrsg.): Gewässerschutz, Wasser, Abwasser (GWA) Band 198 zur 38. Essener Tagung für Wasser- und Abfallwirtschaft 9.-10. März 2005 in Aachen, Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen 2005, ISBN 3-932590-91-0
- PINNEKAMP, J.; MALMS, S.; MONTAG, D.; SCHMELZ, K.-G.; VAN DER MEER, M.; LEHRMANN, F.; BLÖTHE, U.; EITNER, R.; KLETT, W. U. W. SCHWETZEL (2014): ZWIPHOS – Entwicklung eines Zwischenlagerungskonzeptes für Klärschlammmonoverbrennungsaschen für Deutschland mit dem Ziel einer späteren Phosphorrückgewinnung, Abschlussbericht zum BMBF-Projekt, FKZ 033R101 [<https://www.tib.eu/suchen/id/TIBKAT:84011555/>], Zugriff: 28.05.2019
- PINNEKAMP, J.; MONTAG, D.; GETHKE, K.; GOEBEL, S. U. H. HERBST (2007): Rückgewinnung eines schadstofffreien, mineralischen Kombinationsdüngers Magnesiumammoniumphosphat - MAP aus Abwasser und Klärschlamm. Texte 25/07. [<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/3256.pdf>]. Zugriff: 03.09.2018
- PINNEKAMP, J.; MONTAG, D.; HEIL, J.; GAJIC, D.; RATH, W.; DITTRICH, C.; PFENNIG, A.; KRÖCKEL, J.; DOTT, W.; ZIMMERMANN, J.; DOETSCH, P.; VAN NORDEN, H.; GRÖMPING, M.; SEYFRIED, A. (2009): Rückgewinnung von Pflanzennährstoffen, insbesondere Phosphor aus der Asche von Klärschlamm. [http://www.phosphorrecycling.de/index.php/de/publikationen-mainmenu-59/schlussberichte/72-abschlussbericht-pasch/Abschlussbericht_PASCH.pdf], Zugriff: 20.08.2018
- PYREG GMBH (2017): PYREG – Klärschlamm stofflich und energetisch verwerten, Phosphor recyceln [http://www.pyreg.de/wp-content/uploads/N2_news_broschuere_klaerschlamme_DE.pdf], Zugriff: 11.09.2018
- RAK, A. (2018): Das REMONDIS TetraPhos®-Verfahren. In: Verwertung von Klärschlamm. Tagungsband Berliner Klärschlammkonferenz, 5.-6. November 2018, Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN: 978-3-944310-43-5

- SCHNEE, R. (2018): Das ExtraPhos® Verfahren zur optimalen Klärschlammverwertung. In: Verwertung von Klärschlamm. Tagungsband Berliner Klärschlammkonferenz, 5.-6. November 2018, Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, ISBN: 978-3-944310-43-5
- SCHURIG, H. (2018): TetraPhos®-Verfahren – Erste Praxiserfahrungen. [https://www.dwa-no.de/files/_media/content/PDFs/LV_Nordrhein-Westfalen/phosphor/Schurig.pdf]. Zugriff: 20.08.2018
- Six, J.; Lehrmann, F. u. P. Heidecke (2019): Übersicht bestehender Kapazitäten zur thermischen Klärschlammbehandlung und Einschätzung zum künftigen Bedarf und der Entwicklung der Verbrennungskapazitäten. Vortrag auf den 11. DWA-Klärschlammtagen am 23.05.2019 in Würzburg
- SLUDGE2ENERGY (2019): Innovatives Klärschlammverwertungskonzept am Standort Halle-Lochau. [<https://www.sludge2energy.de/de/referenzen/innovatives-klaerschlammverwertungskonzept-am-standort-halle-lochau.html?popup=1>], Zugriff: 13.02.2020
- SMI (2018): Umsetzung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV); Gebührenfähigkeit der Kosten für Klärschlammverwertung. Schreiben an das SMUL vom 29.08.2018
- SMUL (2016): Abfallwirtschaftsplan für den Freistaat Sachsen - Fortschreibung 2016. [<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/27207>], Zugriff: 09.06.2019
- SMUL (2018): Umweltminister setzt ersten Spatenstich zum Bau der ersten Klärschlamm-Pyrolyseanlage in Sachsen. [<https://www.medienservice.sachsen.de/medien/news/218568?page=1>], Zugriff: 25.05.2019
- SMUL (2018a): Öko-Landbau in Sachsen in den Jahren 1994 bis 2017 [https://www.umwelt.sachsen.de/umwelt/download/Oekologische_Landwirtschaft.xls], Zugriff: 28.05.2019
- SMUL (2019): Lagebericht 2018 zur kommunalen Abwasserbeseitigung und zur Klärschlamm Entsorgung im Freistaat Sachsen, Berichtszeitraum 2016/2017. [<https://publikationen.sachsen.de/bdb/artikel/33200/documents/51106>]. Zugriff: 05.10.2019
- SPÖRRI, A.; ERNY, I.; HERMANN, L.; HERMANN, R. (2017): Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung. [https://www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/externe-studienberichte/Beurteilung%20von%20Technologien%20zur%20Phosphor-Rueckgewinnung.pdf.download.pdf/EBP-Bericht_P-Technologien.pdf], Zugriff: 12.09.2018
- STAUB, M.; BIEGEL, M. (2017): Phosphorrückgewinnung - Eigene Erfahrungen und Entwicklungen in der Phosphorrückgewinnung aus kommunalen Klärschlämmen. [http://www.cleantech-ost.de/fileadmin/user_upload/chefredakteur1/Arbeitskreis_KW/180517_Waste_Solutions_Staub.pdf], Zugriff: 23.10.2018
- STAUB, M. (2018): mdl. Mitteilung Dr. Matthias Staub, Geschäftsführer TVF Waste Solutions GmbH, am 20.03.2018
- STEINMETZ, H.; MEYER, C.; REINHARDT, T. (2014): Interkommunales Pilotprojekt zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen in Baden-Württemberg. [<https://320grad.de/wp-content/uploads/2014/08/Studie-%E2%80%9EInterkommunales-Projekt-zur-Phosphor-%C3%BCckgewinnung-aus-Kl%C3%A4rschlammaschen-in-Baden-W%C3%BCrttemberg%E2%80%9C.pdf>], Zugriff: 10.09.2018
- STENZEL, F.; JUNG, R.; WIESGICKL, S.; DEXHEIMER, K.; EIBING, M. U. M. MUNDT (2019): Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlämmen. UBA-Texte 31/2019 [<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/arzneimittelrueckstaende-in-rezyklaten-der>], Zugriff: 02.06.2019
- STLA (2016): 6. Regionalisierte Bevölkerungsvorausberechnung für den Freistaat Sachsen 2015 bis 2030. Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen. [https://www.statistik.sachsen.de/download/080_RegBevPrognose_RegEinheiten-XLS/PROG_L_Sachsen_14.xlsx], Zugriff: 06.06.2019
- STLA (2018): Bodennutzungshaupterhebung im Freistaat Sachsen 2017, Statistischer Bericht C I 2 – j/17, Statistisches Landesamt des Freistaates Sachsen [https://www.destatis.de/GPStatistik/servlets/MCRFileNodeServlet/SNHeft_derivate_00007996/C_I_2_j17_SN_a1b.pdf;jsessionid=725716972BD6F41E6F222BA9446DEEB9], Zugriff: 28.01.2020
- STLA (2018a): Entsorgung von Klärschlamm aus öffentlichen biologischen Abwasserbehandlungsanlagen im Freistaat Sachsen 2017. Statistischer Bericht Q I 9 – j/17 [https://www.statistik.sachsen.de/download/100_Berichte-Q/Q_I_9_j17_SN.pdf], Zugriff: 23.08.2019
- STLA (2019a): Bevölkerung des Freistaates Sachsen am 30. September 2018 nach Kreisfreien Städten und Landkreisen sowie Geschlecht. [https://www.statistik.sachsen.de/download/010_GB-Bev/Bev_Z_Kreis_akt.pdf]. Zugriff: 06.06.2019
- StLA (2019b): Bevölkerungsstand des Freistaates Sachsen nach Kreisfreien Städten und Landkreisen. [https://www.statistik.sachsen.de/download/100_Berichte-A/A_I_1_vj4_17_SN.pdf], Zugriff: 30.10.2019
- SZ – Sächsische Zeitung (2019): Wo der Görlitzer Klärschlamm brennt. Ausgabe vom 19.06.2019
- Takhim, M.; Sonveaux, M.; de Ruiter, R. (2019): The Ecophos Process: Highest Quality Market Products Out of Low-Grade Phosphate Rock and Sewage Sludge Ash. In: Phosphorus Recovery and Recycling. Springer, Singapore, 2019. S. 209-219

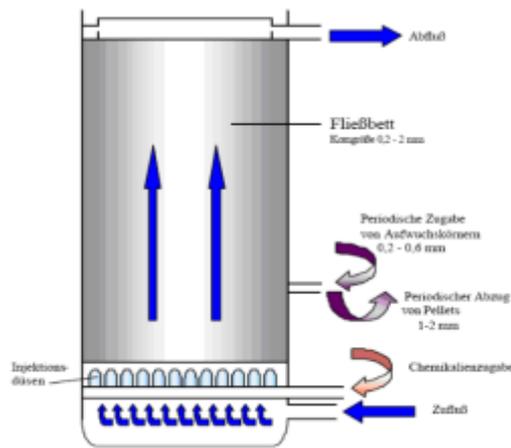
- TERRANOVA ENERGY GMBH (o. J.): TerraNova® Ultra – Der neue Weg zur Klärschlammverwertung - kostengünstig und zukunftsweisend. [<http://terranova-energy.com/pdf/TNEkurz2017de.pdf>], Zugriff: 07.09.2018
- THEILEN, U.; HASPORT, N. U. H. SCHWENK (2019): Absatz- und Vermarktungsmöglichkeiten von Phosphorzyklen aus der Klärschlammaufbereitung. Fachgutachten für das Hessische Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz. [https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/thm_fachgutachten-absatz-_und_vermarktungsmoeglichkeiten_von_p-rezyklaten.pdf]. Zugriff: 23.06.2020
- TOEDTER, R. (2018): mdl. Mitteilung Herr Roman Toedter, RAVON, am 10.12.2018
- TUREK, R. U. M. BOUCHÉ (2018): Möglichkeiten der Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm mit dem MSE-Verfahren – Betriebsergebnisse aus Großversuchen. [https://www.vivis.de/wp-content/uploads/VvK/2018_VvK_451-460_Turek]. Zugriff: 27.10.2020
- UBA - UMWELTBUNDESAMT (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/2018_10_08_uba_fb_klaerschlam_bf_low.pdf]. Zugriff: 17.04.2019
- UFZ (2018): Hydrothermale Carbonisierung HTC [<https://www.ufz.de/index.php?de=37433>], Zugriff: 02.06.2019
- VEOLIA (2019): LAV und TVF bündeln Kompetenz für nachhaltige Klärschlammverwertung. Pressemitteilung vom 12.11.2019, [<https://newsroom.veolia.de/pressreleases/lav-und-tvf-buendeln-kompetenz-fuer-nachhaltige-klaerschlam-verwertung-2942667>], Zugriff: 19.01.2020
- VEOLIA (2019a): Fact-Sheet EVA Jänschwalde, Pressemitteilung vom 12.12.2019, [<https://newsroom.veolia.de/documents/fact-sheet-eva-jaenschwalde-92343>], Zugriff: 23.01.2020
- VEOLIA WATER TECHNOLOGIES (o. J.): Video - Struvia: recycling of phosphorous in wastewater. [<https://www.veoliawatertechnologies.co.uk/tech-resource/video-struvia-recycling-phosphorus-wastewater>], Zugriff: 23.10.2018
- WITTSTOCK, R. (2018): Thermische Klärschlammbehandlung und Phosphorrecycling aus der Asche. [https://bornermel.eu/files/bornermel/uploads/pdfs/Vortraege%20und%20Veranstaltungen/Thermische%20KI%C3%A4rschlammbehandlung%20Phosphorrecycling%20aus%20Asche_BE_Forum_KI%C3%A4rschlamm_Mai_2018.pdf]. Zugriff: 20.08.2018
- ZEGGEL, L. (2017): Erfahrungen und Überlegungen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm. [https://umwelt.hessen.de/sites/default/files/media/hmuelv/zeggel_reg_prasi_da_final.pdf], Zugriff: 10.01.2019
- ZEPKE, F. (2018): Vom Klärschlamm zum Phosphat-Dünger – Das EuPhoRe®-Verfahren. [https://www.dwa-no.de/files/_media/content/PDFs/LV_Nordrhein-Westfalen/phosphor/EuPhoRe.pdf], Zugriff: 11.09.2018
- ZV FROHNBACH (2017): Energieeffizienz/Modellprojekt zur Abwasserbeseitigung auf der zentralen Kläranlage in Niederfrohna: Errichtung einer Pyrolyse zur Klärschlammverwertung“. [http://www.zvfrohnbach.de/files/pdf/Klaerschlam-veredlung_fuer_Internetseite.pdf], Zugriff: 25.05.2019

Anhang

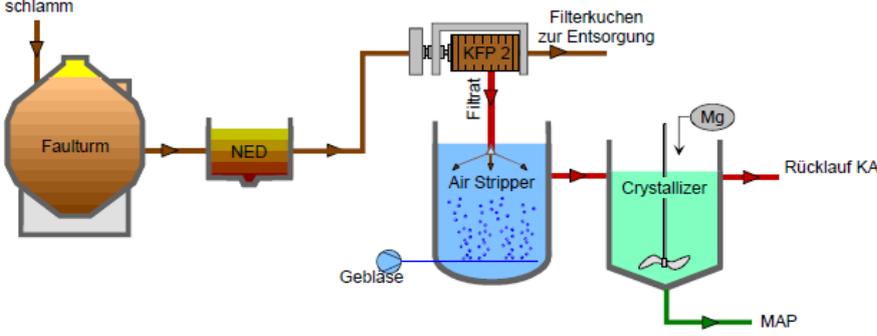
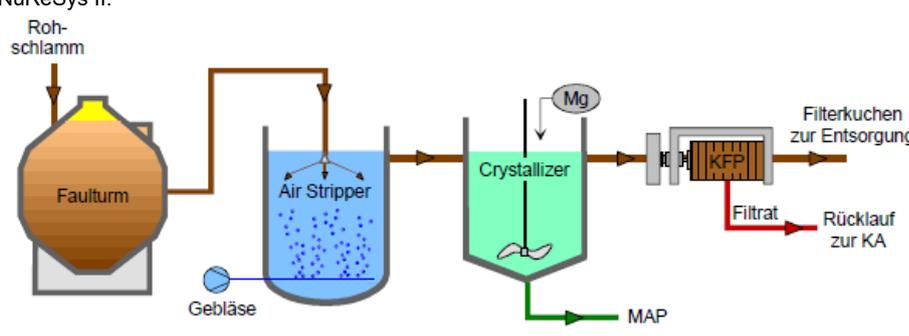
Anhang 1 – Datenblätter Phosphorrückgewinnungsverfahren

Zum besseren Verständnis der in den Datenblättern ausgewiesenen Rückgewinnungsrate ist folgendes zu beachten. Die Phosphorrückgewinnungsraten sind in der Literatur z. T. auf den Kläranlagenzulauf (KA-Zulauf) bezogen. Die zukünftigen Grenzwerte der AbfKlärV beziehen sich allerdings auf den Klärschlamm, die Klärschlammaschen oder die kohlenstoffhaltigen Rückstände aus thermischen Verfahren. Laut Montag (2008) sind 90 % des Phosphors im KA-Zulauf später im Klärschlamm enthalten. Dieser Umstand wurde bei der Umrechnung von Literaturwerten, die sich auf den KA-Zulauf beziehen, auf klärschlammbezogene Werte beachtet. Demnach entspricht bspw. eine Phosphorrückgewinnungsrate von 50 % bezogen auf den KA-Zulauf einer Phosphorrückgewinnungsrate von 55 % bezogen auf den Klärschlamm. Bei der Umrechnung von klärschlammbezogenen Phosphorrückgewinnungsraten auf Phosphorrückgewinnungsraten, die sich auf Klärschlammaschen oder den kohlenstoffhaltigen Rückstand beziehen, wurde angenommen, dass diese gleichgesetzt sind.

DHV CrystalactDateor®

Name des Verfahrens	DHV Crystalactor®
Unternehmen	Royal HaskoningDHV (Niederlande)
Input	Schlammwasser
Verfahrenstyp	Kristallisations- und Fällungsverfahren
Rückgewinnungsrate	bis 40 % bezogen auf KA-Zulauf (Egle et al., 2014), entspricht bis 44 % bezogen auf Klärschlamm
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> Zuerst wird Schlammwasser mit Essigsäure versetzt, um eine Rücklösung des Phosphors zu erreichen (LfU, 2015) Schlammwasser durchströmt Reaktor von unten nach oben und wird mit einem Impfmateriale (Filtersand oder Mineralien) zur Kristallbildung versetzt; es bildet sich ein Wirbelschichtbett (Hermann, 2009) Durch zusätzliche Dosierung von Kalkmilch entstehen Calciumphosphat-Kristalle (alternativ: durch Zugabe von Natronlauge und Magnesiumchlorid entsteht Magnesium-Ammonium-Phosphat) (LfU, 2015) Mit zunehmender Größe sinken die Kristalle zu Boden und werden dort abgezogen (Hermann, 2009)
Schematische Darstellung des Verfahrens	 <p>Quelle: (Hermann, 2009)</p>
Phosphorprodukt	<ul style="list-style-type: none"> Calciumphosphat (bei Zugabe von Kalkmilch) (LfU, 2015) Magnesium-Ammonium-Phosphat (bei Zugabe von Magnesium und Natronlauge) (LfU, 2015) außerdem möglich: Magnesiumphosphat, Kaliummagnesiumphosphat (Montag, 2008).
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Erhalt eines marktfähigen Produktes (Hermann, 2009) praktisch keine Nebenverunreinigungen (Hermann, 2009) Pellets haben nach Lufttrocknung geringen Wassergehalt (Pinnekamp et al., 2007)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Voraussetzung: Bio-P-Elimination Einhaltung des Grenzwertes kann aufgrund geringer Rückgewinnungsrate nicht für alle Kläranlagen garantiert werden
Entwicklungsstand	Kristallisations- und Fällungsverfahren
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate für Kläranlagen mit Bio-P-Elimination und einem P-Gehalt von maximal 3,5 % im Klärschlamm eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

NuReSys®

Name des Verfahrens	NuReSys®
Unternehmen	Nutrients Recovery Systems (Belgien)
Input	Filtrat nach Schlammwässerung (NuReSys I), Faulschlamm (NuReSys II)
Verfahrenstyp	Kristallisations- und Fällungsverfahren
Rückgewinnungsrate	26 % bezogen auf KA-Zulauf (Montag et al., 2015), entspricht 29 % bezogen auf Klärschlamm
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> Filtrat (NuReSys I) oder Faulschlamm (NuReSys II) wird im Air Stripper mit Luft belüftet, um Kohlenstoffdioxid auszutreiben und pH-Wert zu erhöhen (IAT, 2014) ggf. zusätzliche Dosierung von Natronlauge zur pH-Wert-Einstellung (IAT, 2014) Im Crystallizer kristallisieren dann Magnesium-Ammonium-Phosphat unter Zugabe von Magnesiumsalzen (IAT, 2014)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>NuReSys I:</p>  <p>(NED = Nacheindicker; KFP = Kammerfilterpressen)</p> <p>NuReSys II:</p>  <p>Quelle: IAT (2014)</p>
Phosphorprodukt	Magnesium-Ammonium-Phosphat (bei Zugabe von Magnesium) (LfU, 2015)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Magnesium-Ammonium-Phosphat weitestgehend frei von Reststoffen (IAT, 2014)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Voraussetzung: Bio-P-Elimination Einhaltung des Grenzwertes kann aufgrund geringer Rückgewinnungsrate nicht für alle Kläranlagen garantiert werden
Entwicklungsstand	Drei großtechnische Anlagen im Einsatz (Belgien und Niederlande) (NuReSys, 2015)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate für Kläranlagen mit Bio-P-Elimination und einem P-Gehalt von maximal 2,8 % im Klärschlamm eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

P-RoC

Name des Verfahrens	P-RoC
Unternehmen	Karlsruher Institut für Technologie
Input	Schlammwasser
Verfahrenstyp	Kristallisations- und Fällungsverfahren
Rückgewinnungsrate	30 % bezogen auf KA-Zulauf (Montag et al., 2015), entspricht 33 % bezogen auf Klärschlamm
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> Schlammwasser wird in einem Kristallisationsreaktor mit Calcium-Silikat-Hydrat (CSH) versetzt (DPP, 2018) CSH dient als Kristallisationskeim und setzt durch Freisetzung von Hydroxidionen den pH-Wert herauf in ein für die Bildung von calciumphosphathaltige Mineralien günstiges Milieu (DPP, 2018) Mineralien fallen nach Bildung aus und können nach Trocknung als Düngemittel verwendet werden (DPP, 2018)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: KIT (2013)</p>
Phosphorprodukt	Magnesium-Ammonium-Phosphat und Calcium-Siliko-Phosphat (DPP, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Leicht in Abwasserreinigungsanlagen integrierbar (DPP, 2018)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Voraussetzung: Bio-P-Elimination Zusatzstoffe nötig (DPP, 2018) Trockensubstanz im Zulauf muss <1 % sein (DPP, 2018) eventuelle Hemmung der Kristallisation durch organische Belastung (DPP, 2018) Einhaltung des Grenzwertes kann aufgrund geringer Rückgewinnungsrate nicht für alle Kläranlagen garantiert werden
Entwicklungsstand	Pilotanlage in Großostheim (DPP, 2018); großtechnische Umsetzung geplant in Neuburg a. d. Donau (Montag et al., 2015)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung bleibt abzuwarten. Die zukünftigen Anforderungen der AbklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate für Kläranlagen mit Bio-P-Elimination und einem P-Gehalt von maximal 2,9 % im Klärschlamm eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

PEARL®

Name des Verfahrens	PEARL®
Unternehmen	Ostara Nutrient Recovery Technologies Inc.
Input	Schlammwasser
Verfahrenstyp	Kristallisations- und Fällungsverfahren
Rückgewinnungsrate	<ul style="list-style-type: none"> 30 % bezogen auf KA-Zulauf (LfU, 2015), 33 % bezogen auf Klärschlamm; mit Verfahrenserweiterung (WASSTRIP®) maximal 45 % bezogen auf KA-Zulauf (LfU, 2015), 50 % bezogen auf Klärschlamm
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> Nach Schlammmentwässerung wird Schlammfiltrat mit Magnesiumchlorid und Natronlauge (zur pH-Wert-Erhöhung) in einem Kristallisationsreaktor gegeben (DPP, 2018a) durch interne Zirkulation wird die Bildung von Struvit (Produktname: Chrystal Green®) gefördert (DPP, 2018a) nach ausreichendem Wachstum sinken die Struvitkristalle nach unten und werden von dort ausgeschleust und danach getrocknet (DPP, 2018a)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: Ostara (o. J.)</p>
Phosphorprodukt	Magnesium-Ammonium-Phosphat
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Reaktor kann leicht nach der Schlammmentwässerung installiert werden (DPP, 2018a) Verhindert Struvitinkrustationen in den Schlammeleitungen (DPP, 2018a) Gewinnung von hochwertigem Struvit mit definierter Größe (DPP, 2018a) verringert auch Ammoniumkonzentration (DPP, 2018a)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Voraussetzung: Bio-P-Elimination (LfU, 2015) Zusatzstoffe werden benötigt (LfU, 2015) Phosphatkonzentration im Zulauf muss >75 mg/l sein (LfU, 2015)
Entwicklungsstand	Mehrere Großtechnische Anlagen in Nordamerika und Europa (GB: Slough, NL: Amersfoort) (Montag et al., 2015)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate für Kläranlagen mit Bio-P-Elimination und einem P-Gehalt von maximal 2,9 % eingehalten werden. Mit WASSTRIP® können die Anforderungen unabhängig vom P-Gehalt eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

PhosForce

Name des Verfahrens	PhosForce
Unternehmen	Veolia Wasser Deutschland GmbH
Input	Klärschlamm- und Faulschlammfiltrat
Verfahrenstyp	Kristallisations- und Fällungsverfahren
Rückgewinnungsrate	>50 % möglich bezogen auf Klärschlamm (Hofmann, 2018)
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Primärschlamm aus der Vorklämung und Überschussschlamm aus der Nachklämung wird nach der Versauerung entwässert (Hofmann, 2018) ■ Filtrat wird in den Struvia™-Reaktor eingeleitet; Filtrückstand geht in die biologische Faulung (Hofmann, 2018) ■ Nach der Faulung wird der Schlamm ein zweites Mal entwässert; Filtrat kann optional ebenfalls in den Struvia™-Reaktor eingeleitet werden (Hofmann, 2018) ■ Filtrat wird im Struvia™-Reaktor mit Magnesiumsalze und Stoffen zur pH-Wert-Absenkung vermischt, wodurch Magnesium-Ammonium-Phosphat im Reaktor auskristallisiert (Hofmann, 2018) ■ Durch den im Struvia™-Reaktor installierten Rotor werden Totzonen und die Kristallisationszeit verringert (Veolia, o. J.). ■ Das phosphatarme Wasser wird über einen Ablauf abgezogen, wobei die Kristalle durch den Lamellenabscheider zurückgehalten werden (Veolia, o. J.). ■ Magnesium-Ammonium-Phosphat (Struvit) wird am Reaktorboden abgezogen und danach entwässert (Veolia, o. J.) ■ Alternativ kann bei Zugabe von Calciumsalzen statt Magnesiumsalzen auch Calciumphosphat (Brushit) erhalten werden (Hofmann, 2018)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Verfahrensbeispiel</p> <p>Quelle: DPP (2019)</p>
Phosphorprodukt	<ul style="list-style-type: none"> ■ Magnesium-Ammonium-Phosphat (bei Zugabe von Magnesiumsalzen) (Hofmann, 2018) ■ Calciumphosphat (bei Zugabe von Calciumsalzen) (Hofmann, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ einfach anwendbar und leicht in bestehende Anlage zu integrieren ■ Vermeidung von Struvitinkrustationen ■ Für Kläranlagen mit biologischer P-Elimination, aber auch für Anlagen mit chemischer P-Elimination geeignet (Hofmann, 2018)
Bemerkung	Limitierte Datengrundlage zur objektiven Einschätzung des Verfahrens.
Entwicklungsstand	Pilotanlage in Schönebeck (Elbe) Errichtung einer Demonstrationsanlage in Schönebeck (Elbe) in 2019
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können auf Basis der angestrebten Rückgewinnungsrate von >50 % eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

AirPrex®

Name des Verfahrens	AirPrex® (auch: Berliner Verfahren)
Unternehmen	CNP – Technology Water and Biosolids GmbH
Input	Faulschlamm
Verfahrenstyp	Kristallisations- und Fällungsverfahren
Rückgewinnungsrate	11–22 % bezogen auf KA-Zulauf (Montag et al., 2015), entspricht bis 12-24 % bezogen auf Klärschlamm
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> Faulschlamm wird in einem Reaktorsystem belüftet (CO₂-Strippung), was zu einer pH-Wert-Erhöhung führt (IAT, 2014) Gleichzeitig wird Magnesiumchlorid zugegeben, was zu Magnesium-Ammonium-Phosphat-Bildung führt (IAT, 2014) Magnesium-Ammonium-Phosphat-Kristalle sedimentieren und werden abgeschieden (IAT, 2014)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: CNP (2016)</p>
Phosphorprodukt	Magnesium-Ammonium-Phosphat (Montag et al., 2015)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> einfache Technologie (LfU, 2015) Minimierung der Magnesium-Ammonium-Phosphat-Inkrustationen gesamten Schlamm- und Zentratbereich (CNP, 2016) verbesserte Entwässerungseigenschaften (Montag et al., 2015) Erhalt eines marktfähigen Produktes („Berliner Pflanze“) Reduzierung des Verbrauchs von Flockungshilfsmitteln (Montag et al., 2015) gesteigerter Mineralisationsgrad im Faulschlamm (Montag et al., 2015)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Voraussetzung: Bio-P-Elimination (CNP, 2016) geringes Rückgewinnungspotential von 11-22 % (Montag et al., 2015) Abrasiver Verschleiß durch Magnesium-Ammonium-Phosphat-Kristalle an Entwässerungszentrifugen (Montag et al., 2015) mikrobiologische Unbedenklichkeit ungeklärt (LfU, 2015)
Entwicklungsstand	Acht großtechnische Anlagen bis Ende 2015 (CNP, 2015)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate für Kläranlagen mit Bio-P-Elimination und einem P-Gehalt von maximal 2,2 bis 2,5% im Klärschlamm eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

Name des Verfahrens	EuPhoRe®
Unternehmen	EuPhoRe GmbH
Input	Klärschlamm und andere Biomassen (Wirtschaftsdünger, Gärreste, ggf. Komposte) (DPP, 2018b)
Verfahrenstyp	thermochemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	98 % bezogen auf Klärschlamm (DPP, 2018b)
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ ggf. Zerkleinerung auf <10 mm (Zepke, 2018) ■ Zugabe von Alkali- und/oder Erdalkalichloriden oder -sulfaten, welche im Schlamm dissoziieren, bereitet Schwermetallaustrag vor und verbessert P-Löslichkeit im Ascheprodukt (DPP, 2018b) ■ Trocknung (DPP, 2018b) ■ Reduktion im Drehrohrreaktor bei 650-750 °C führt zur Bildung von Biomassekoks und Pyrolysegas (Zepke, 2018) ■ gleichzeitige Ausschleusung der Metalle als Chloride in der Gasphase (DPP, 2018b) ■ oxidative Nachverbrennung (bei 900-1.000 °C – Zepke, 2018) sorgt für vollständigen Abbau von organischen Schadstoffe und für den Umbau der ursprünglichen Mineralsubstanz zu pflanzenverfügbaren Phosphaten (DPP, 2018b), weitere Schwermetallentfrachtung (Zepke, 2018)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: Zepke (2018)</p>
Phosphorprodukt	phosphathaltige Asche (DPP, 2018b)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Produkt hält Vorgaben der Düngemittelverordnung ein (DPP, 2018b) ■ technische und ökonomische Synergien mit Feststoffverbrennungsanlagen (MVA, Biomasse-, Ersatzbrennstoff- oder Kohle-Kraftwerke) möglich (DPP, 2018b) ■ geringer Chemikalieneinsatz (Zeggel, 2017) ■ geringe Mengen an Reststoffen (Schwermetalle) (Zeggel, 2017) ■ Nutzung des Pyrolysegas (Trocknung, Heizen und/oder Kühlen, Stromerzeugung) (Zepke, 2018)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ verfahrenstechnisch erhöhter Aufwand (Zeggel, 2017) ■ Für kleiner Kläranlagen nur bedingt geeignet (Zeggel, 2017).
Entwicklungsstand	<ul style="list-style-type: none"> ■ großtechnische Umsetzung in Oftringen und Urvier (beide Schweiz) ■ Pilotanlage in Dinslaken ■ Weitere großtechnische Umsetzung geplant für das Jahr 2019 in Mannheim (Klose, 2018) und Offenbach am Main (EUWID Recycling und Entsorgung, 2018), auch Planungen für TREA Leuna in Diskussion
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

ExtraPhos®

Name des Verfahrens	ExtraPhos®, auch Budenheimer-(Kohlensäure-)Verfahren
Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> Chemische Fabrik Budenheim KG (Verfahrensentwicklung, Forschung) Ingenieurgesellschaft Steinburg mbH (Entwurfsplanung) Rotaria Energie- und Umwelttechnik GmbH (Konstruktion, Realisierung)
Input	Klärschlamm
Verfahrenstyp	Kristallisations- und Fällungsverfahren
Rückgewinnungsrate	45 % bezogen auf Kläranlagenzulauf (Montag et al., 2015), entspricht 50 % bezogen auf Klärschlamm
Beschreibung	<p>Montag et al., 2015:</p> <ul style="list-style-type: none"> In einem Rohrreaktor wird unter Druck Klärschlamm und CO₂ eingebracht. CO₂-Lösung führt zu Bildung von Kohlensäure und senkt pH-Wert, in Folge dessen Phosphate gelöst werden Abtrennung des phosphatarmen Klärschlammes Austreibung von CO₂ (Kreislaufführung), ggf. Zugabe von Kalkmilch zu Erhöhung des pH-Wertes führt zu Fällung von Dicalciumphosphat Schlammwasser kann danach zum Anmischen des Klärschlammes benutzt werden
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: Budenheim, 2018</p>
Phosphorprodukt	Calciumphosphat
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> hohe Rückgewinnungsquote (Montag et al., 2015) unabhängig der Eliminationsart (chemisch oder biologisch) einsetzbar (Schnee, 2018) geringerer Energieverbrauch bei Klärschlammmentwässerung (Montag et al., 2015) höherer Heizwert des Klärschlammes, aufgrund höherer Konzentrierung (Montag et al., 2015) Klärschlamm kann aufgrund hoher Rückgewinnungsquote in der Zementindustrie eingesetzt werden (Montag et al., 2015) Einziger Zusatzstoff ist Kohlenstoffdioxid, welcher nach Zugabe im Kreislauf geführt wird (Schnee, 2018)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> Bisher keine finanzielle Abschätzung (Montag et al., 2015). ungeklärte Düngemittelverwendung, weil keine Schwermetallsenke (Montag et al., 2016)
Entwicklungsstand	mobile Pilotanlage (bisherige Standorte: Mainz, Itzehoe)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung bleibt abzuwarten. Die Verwendung des phosphorhaltigen Produkts muss abgesichert sein. Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

KRN Mephrec®

Name des Verfahrens	KRN Mephrec®
Firma	ingitec® Engineering GmbH
Input	Klärschlammasche, Klärschlamm
Verfahrenstyp	thermochemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	60 % bezogen auf KA-Zulauf (Egle et al., 2014), entspricht 67 % bezogen auf Klärschlamm
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Brikettherstellung aus Klärschlamm, -aschen und Tiermehl (KRN-Mephrec, 2018) ■ Briketts werden mit Gießereikoks und Zuschlagstoffen (Kies, Kalkstein, Diabas) in einem Kupolofen geschmolzen (DPP, 2018c) ■ organische Stoffe werden vergast (KRN-Mephrec, 2018) ■ Schlacke je nach Abstechhöhe eisen- oder phosphatreicher (KRN-Mephrec, 2018) ■ Entstandenes Brenngas wird in Nachbrennkammer nachverbrannt, wobei phosphorhaltige Stäube abgeschieden werden (DPP, 2018c) ■ Phosphorhaltige Stäube können zusammen mit der phosphatreichen Schlacke zu Düngemittel verarbeitet werden (DPP, 2018c) ■ Alternativ: Aufbereitung der phosphorhaltige Stäube zur Phosphorsäureherstellung; Verwendung der Schlacke als Bau(zuschlag)stoff (DPP, 2018c) ■ Schwermetalle werden über Rauchgasreinigung oder über Eisenschlacke abgeschieden (KRN-Mephrec, 2018)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: KRN-Mephrec (2013)</p>
Phosphorprodukt	P-Schlacke und Calciumsilikatphosphat (KRN-Mephrec, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ hohe Rückgewinnungsrate (LfU, 2015) ■ energetische Nutzung des Synthesegases (LfU, 2015) ■ Rückgewinnung von Eisen (Voraussetzung: chemische P-Elimination mit Eisen) (DPP, 2018c)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ komplexe, im Entsorgungsmaßstab nicht erprobte Hochtemperaturtechnologie (LfU, 2015) ■ höherer Platzbedarf als Monoverbrennungsanlage ■ hoher Energieeinsatz (Koks, Sauerstoff) (LfU, 2015) ■ Optimierungspotential in Bezug auf quasi-kontinuierlichen Prozess (LfU, 2015)
Entwicklungsstand	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pilotanlage in Nürnberg wurde bis 2017 betrieben (auf Grundlage der Patente von ingitec® Engineering GmbH, jedoch in stark abgewandelter Form) ■ Anlage konnte nicht im Dauerbetrieb getestet werden (KRN-Mephrec, 2018) ■ vor der Planung einer großtechnischen Anlage müssen Nachrüstungen an der Pilotanlage erfolgen (KRN-Mephrec, 2018)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Um eine abschließende Bewertung hinsichtlich der Einsatzfähigkeit abzugeben, müssen Erfahrungen an einer modifizierten Anlage gesammelt werden. Der Einsatz des Verfahrens lohnt sich erst ab Klärschlamm-mengen von 15.000 Mg TM/a (DPP, 2018c).

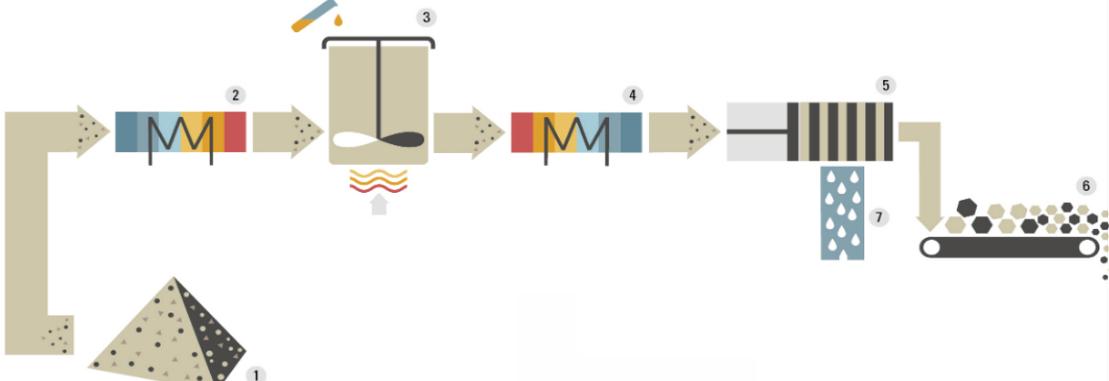
PYREG

Name des Verfahrens	PYREG
Entwickler	PYREG GmbH
Input	Klärschlamm (TS: >85 %) (DPP, 2018d)
Verfahrenstyp	Vergasungs-, Pyrolyse- oder Karbonisierungs-(HTC-) Verfahren
Rückgewinnungsrate	>90 % bezogen auf Klärschlamm (DPP, 2018d)
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Verkohlung des Klärschlammes bei 500–700 °C in einem Doppelschneckenreaktor führt zur Karbonisierung (DPP, 2018d) und vollständige Zerstörung von organischen Schadstoffen (PYREG, 2017) ■ Entstandene Gase werden nachgeschaltet im FLOX®-Verfahren (flammlöse Oxidation) bei rund 1.000 °C vollständig verbrannt (Minimierung der NO_x-Emissionen) (DPP, 2018d) ■ Gasphase wird danach durch einen alkalischen Rauchgaswäscher (Abscheidung saurer Gase) und einem Aktivkohlefilter (Abscheidung von Quecksilber) geführt (PYREG, 2017)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: PYREG (2017)</p>
Phosphorprodukt	phosphorhaltiges Karbonisat (DPP, 2018d)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Karbonisierungsprozess verläuft autotherm (DPP, 2018d), überschüssige Wärme kann zur Trocknung eingesetzt werden ■ Phosphor ist pflanzenverfügbar (PYREG, 2017)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Voraussetzungen: Klärschlammaufkommen von 1.400 t/a, TS-Gehalt von 80 %, Mindestheizwert von 10 MJ/kg, schütt- und rieselfähig (PYREG, 2017) ■ Einsatz vieler Stoffe (CaCl₂, MgCl₂, CaO, Ca(OH)₂, Na₂CO₃, Na₂SO₄) (DPP, 2018d) ■ Zulassung als Düngemittel bisher nicht geklärt
Entwicklungsstand	Großtechnische Umsetzung in Linz-Unkel und Homburg
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Um eine abschließende Bewertung hinsichtlich der Einsatzfähigkeit abzugeben, muss die Verwendung des Karbonisats geklärt sein (Düngemittelrechtliche Zulassung). Eventuelle Weiterverarbeitungen des Karbonisats würden die Verfahrenskosten erhöhen und damit die Wirtschaftlichkeit verringern.

Stuttgarter Verfahren und MSE-Verfahren

Name des Verfahrens	Stuttgarter Verfahren und MSE-Verfahren														
Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> ■ iat – Ingenieurberatung GmbH (Stuttgarter Verfahren) ■ MSE-Mobile Schlammntwässerungs GmbH (MSE-Verfahren) 														
Input	Faulschlamm														
Verfahrenstyp	Kristallisations- und Fällungsverfahren														
Rückgewinnungsrate	Bei pH 4,5: 43% bezogen auf KA-Zulauf (Montag et al., 2015), entspricht 48 % bezogen auf Klärschlamm >50% möglich (DPP, 2018f)														
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Phosphatlösung durch Senkung des pH-Wertes mit Schwefelsäure (Eisenphosphatschlämme: pH 4; Aluminiumphosphatschlämme: pH 3) (DPP, 2018e; DPP, 2018f) ■ Entwässerung und Abscheidung des Filterkuchens (DPP, 2018e; DPP, 2018f) ■ Reinigung des sauren Permeats mittels Ultrafiltration (DPP, 2018e; DPP, 2018f) ■ Zugabe von Zitronensäure (zur Komplexierung von Schwermetallen und Eisen), Magnesiumoxid (zur Gleichgewichtseinstellung der Edukte für die Magnesium-Ammonium-Phosphat-Bildung), Natronlauge (Anhebung des pH-Wertes zur Kristallisation von Magnesium-Ammonium-Phosphat) (DPP, 2018e; DPP, 2018f) ■ Abscheidung des Magnesium-Ammonium-Phosphats und Einleitung des entwässerten Klärschlamms (DPP, 2018e; DPP, 2018f) 														
Schematische Darstellung des Verfahrens	<table border="0" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;"><u>Faulschlamm</u></th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;"><u>Rücklösung</u></th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;"><u>Entwässerung</u></th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;"><u>Reinigung</u></th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;"><u>Fällung</u></th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;"><u>Produktabzug</u></th> <th style="text-align: left; border-bottom: 1px solid black;"><u>Rücklauf KA</u></th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • 10 m³/Charge </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • H₂SO₄ • pH 4 </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • KFP • TS: 25-30 % </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • Ultrafiltration </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> → Komplexierung (K) → Mg-Zugabe → Neutralisation (N) → MAP-Bildung </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • Abtrennung • Trocknung </td> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> • PO₄-P • NH₄-N • CSB </td> </tr> </tbody> </table> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-right: 20px;"> <ul style="list-style-type: none"> • Zitronensäure (K) • MgO • NaOH: pH 8 (N) </div> </div> <p>Quelle: DPP (2018e)</p>	<u>Faulschlamm</u>	<u>Rücklösung</u>	<u>Entwässerung</u>	<u>Reinigung</u>	<u>Fällung</u>	<u>Produktabzug</u>	<u>Rücklauf KA</u>	<ul style="list-style-type: none"> • 10 m³/Charge 	<ul style="list-style-type: none"> • H₂SO₄ • pH 4 	<ul style="list-style-type: none"> • KFP • TS: 25-30 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Ultrafiltration 	<ul style="list-style-type: none"> → Komplexierung (K) → Mg-Zugabe → Neutralisation (N) → MAP-Bildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abtrennung • Trocknung 	<ul style="list-style-type: none"> • PO₄-P • NH₄-N • CSB
<u>Faulschlamm</u>	<u>Rücklösung</u>	<u>Entwässerung</u>	<u>Reinigung</u>	<u>Fällung</u>	<u>Produktabzug</u>	<u>Rücklauf KA</u>									
<ul style="list-style-type: none"> • 10 m³/Charge 	<ul style="list-style-type: none"> • H₂SO₄ • pH 4 	<ul style="list-style-type: none"> • KFP • TS: 25-30 % 	<ul style="list-style-type: none"> • Ultrafiltration 	<ul style="list-style-type: none"> → Komplexierung (K) → Mg-Zugabe → Neutralisation (N) → MAP-Bildung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abtrennung • Trocknung 	<ul style="list-style-type: none"> • PO₄-P • NH₄-N • CSB 									
Phosphorprodukt	Magnesium-Ammonium-Phosphat (DPP, 2018e; DPP, 2018f)														
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Einhaltung der AbfKlärV ist bei beiden Verfahren gegeben (DPP, 2018e; DPP, 2018f) ■ direkt an bestehende Klärtechnik adaptierbar (LfU, 2015) ■ keine Umstellung der P-Elimination nötig (DPP, 2018e; DPP, 2018f) 														
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Stuttgarter Verfahren + bisher nur im Teilstrom erprobt (DPP, 2018e); Wiedereinleitung in den Klärprozess bei großtechnischer Umsetzung fraglich; für das MSE-Verfahren waren keine Angaben dazu verfügbar ■ Einsatz mehrere Zusatzstoffe 														
Entwicklungsstand	<ul style="list-style-type: none"> ■ MSE-Verfahren: an mehreren Standorten durch mobile Versuchsanlage erfolgreich getestet (DPP, 2018f) ■ Stuttgarter Verfahren: Pilotanlage in der Verbandsanlage Offenburg-Griesheim (DPP, 2018e) 														
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die Problematik bezüglich der Wiedereinleitung in den Klärprozess bei großtechnischer Umsetzung bleibt abzuwarten. Bei möglicher Rückgewinnungsrate von >50%, ist das Verfahren als dezentrale Lösung möglich.														

TerraNova® Ultra

Name des Verfahrens	TerraNova® Ultra
Unternehmen	TerraNova Energy GmbH
Input	Klärschlamm
Verfahrenstyp	Vergasungs-, Pyrolyse- oder Karbonisierungs-(HTC-) Verfahren
Rückgewinnungsrate	60-80 % (TerraNova, o. J.) bezogen auf Klärschlamm
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ DPP, 2018g: ■ Entwässertes Klärschlamm (Trockenrückstand von 5 - 30%) (s. schematische Darstellung Schritt 1) wird mit Hochdruckpumpe in den Eintragswärmetauscher (2) eingebracht ■ Erwärmung des Klärschlammes für 5 h bei 180 °C unter Zugabe von Schwefelsäure als Katalysator (Hydrothermale Karbonisierung) führt zu Bildung von kohlehaltiger Suspension (3), Phosphate gehen dabei in Lösung ■ Abkühlung der Suspension im Austragswärmetauscher (4) ■ Suspension wird entwässert (Nr. 5): Trennung von P-armen regenerativer Kohle (Nr. 6) und P-reichem Filtrat (Nr. 7) ■ Phosphor im Filtrat wird mit Calcium-Silikat-Hydrat kristallisiert und abgetrennt
Schematische Darstellung des Verfahrens	 <p>Quelle: TerraNova (2015)</p> <p>Erklärung der Nummerierung: (1) Klärschlamm, (2) Eintragswärmetauscher, (3) Rührreaktor zur HTC, (4) Austragswärmetauscher, (5) Entwässerungseinheit, (6) HTC-Kohle, (7) phosphor- und stickstoffreiches Filtrat</p>
Phosphorprodukt	Phosphorbeladene CSH-Partikel (Buttmann, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Anforderungen der AbfklärV werden erfüllt (DPP, 2018g) ■ Für alle Schlammarten geeignet (Buttmann, 2018). ■ Schwermetalle sind an Kohle gebunden, können bei Bedarf mit Sulfiden gefällt werden (DPP, 2018g) ■ Kohle kann mitverbrannt werden (Monoverbrennung entfällt) (DPP, 2018g) ■ Energieeffizient (Karbonisierung und Entwässerung) (DPP, 2018g) ■ geringerer Säurebedarf als bei reinen Säureaufschlüssen (DPP, 2018g) ■ Filtrat kann zur Biogaserzeugung genutzt werden und würde Energiebedarf des Verfahrens vollständig decken (Buttmann, 2018)
Bemerkung	Limitierte Datengrundlage zur objektiven Einschätzung des Verfahrens
Entwicklungsstand	Pilotanlage in Düsseldorf erfolgreich getestet, befindet sich nun im Aufbau in Duisburg (Stand: November 2018) (Buttmann, 2018)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfklärV können eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

Ash Dec®

Name des Verfahrens	Ash Dec®/Outotec
Unternehmen	Outotec GmbH & Co. KG
Input	Klärschlammasche, getrockneter Klärschlamm
Verfahrenstyp	thermochemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	85 % bezogen auf KA-Zulauf (Egle et al., 2014), entspricht 94 % bezogen auf Klärschlamm/-asche
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Klärschlammasche wird mit einer Lösung aus Additiven (ehemals Calciumchlorid und/oder Magnesiumchlorid; neuerdings Natriumhydrogenkarbonat oder Natriumsulfat – Montag et al., 2015) im Drehrohrofen erhitzt (950 - 1.000 °C) (DPP, 2018h) ■ Ausschleusung der Schwermetalle über das Rauchgas (DPP, 2018h) ■ Phosphathaltige Asche wird über eine mechanische Nachbehandlung zu einem Düngemittel aufbereitet (DPP, 2018h).
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: DPP, 2018h</p>
Phosphorprodukt	Thermisch aufgeschlossene Klärschlammasche mit Ca-Alkali-Phosphaten als P-Komponente (Adam, 2018).
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ geringere Cadmium- und Urangelhalte im Vergleich zu Phosphatgestein (DPP, 2018h) ■ Phosphor im Düngemittelprodukt pflanzlich hochverfügbar (DPP, 2018h) ■ Erfüllen die Anforderungen der europäischen Düngemittelgesetze (DPP, 2018h) ■ sehr hohe Rückgewinnungsquote
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ kaum wirtschaftlich, besonders bei geringen Aschemengen (<20.000 t/a) (DPP, 2018h) ■ zusätzliche Kosten für Erdgas (DPP, 2018h) ■ Zusatzstoffe werden benötigt (DPP, 2018h) ■ Klärschlamm muss getrocknet werden (DPP, 2018h) ■ neue, zu entsorgende Abfallströme (Steinmetz et al., 2014)
Entwicklungsstand	Zwischen 2008 und 2010 Pilotanlage in Leoben (Österreich) (Adam und Krüger, 2013)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung bleibt abzuwarten. Die zukünftigen Anforderungen der AbfklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens wäre direkt an den oder in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am wirtschaftlichsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen wäre ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt sinnvoll.

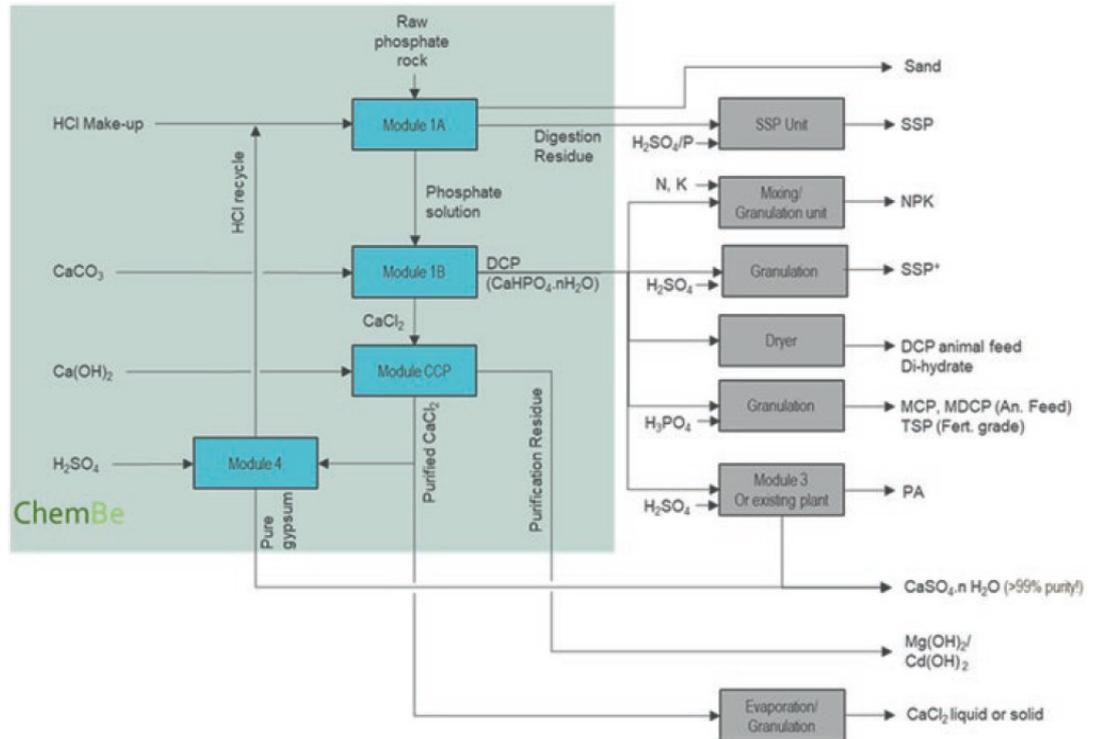
Ash2@Phos

Name des Verfahrens	Ash2@Phos
Unternehmen	EasyMining Sweden AB
Input	Klärschlammasche
Verfahrenstyp	nasschemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	90–95 % bezogen auf Klärschlammaschen (DPP, 2018i)
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Lösung von Phosphor, Eisen und Aluminium aus der Asche mit Salzsäure für 30 bis 120 Minuten bei Raumtemperatur (Salzsäure ist Abfallprodukt von (Müll-)Verbrennungsanlagen: lokale Synergien möglich); dabei Erhalt von Restsand (DPP, 2018i; Bhasin, 2017) ■ Abtrennung der festen Stoffe (Sand, Gips, Silikate und nicht gelöste Metalloxide) durch einen Vakuumbandfilter (Bhasin, 2017) ■ Fällung von Schwermetallen mit Sulfiden (z.B. Aluminiumsulfat) führt zu Bildung von Metallsulfiden, welche durch Filtration oder Zentrifugierung abgetrennt werden (Bhasin, 2017) ■ pH-Wert-Erhöhung der Lösung mit Kalk führt zur Fällung von Calciumphosphat, Eisen- und Aluminiumhydroxid (Zwischenprodukte) (DPP, 2018i) ■ je nach Aschemenge und lokalen oder regionalen Gegebenheiten können die Zwischenprodukte direkt weiter aufbereitet werden (Industrial-Concept) oder zu einer Aufbereitungsanlage transportiert werden (City-Concept) (EasyMining, 2018) ■ vermarktbare Phosphor-Endprodukte: entweder MAP (Monoammoniumphosphat) oder DCP (Di-Kalziumphosphat), nebensächlicher: Phosphorsäure und Superphosphate, Eisenchlorid, Eisensulfat und Aluminiumsulfat (EasyMining, 2018)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Ash2 Phos – Stadtkonzept</p> <p>Ash2 Phos – Industriekonzept</p> <p>* mono/di-calciumphosphat (Futter Phosphat), mono/di-ammoniumphosphat (Dünger)</p> <p>Quelle: DPP (2018i)</p>
Phosphorprodukt	Ca-Phosphate, Ammoniumphosphate, Phosphorsäure (75 %ig) (Adam, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Die eingesetzten Chemikalien sind Bestandteil der Rezyklate (DPP, 2018i) ■ Energieeffizient, weil keine Temperaturerhöhung über 40°C nötig ist (EasyMining, 2018) ■ Aschen mit geringen Phosphorgehalten können ebenso behandelt werden (DPP, 2018i) ■ Eisen- und Aluminiumverbindungen können als Fällmittel in Kläranlagen eingesetzt werden (DPP, 2018i) ■ Restsand kann in der Zementindustrie oder als Füllmaterial eingesetzt werden (EasyMining, 2018)
Bemerkung	Limitierte Datengrundlage zur objektiven Einschätzung des Verfahrens.
Entwicklungsstand	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pilotanlage in Helsingborg (Schweden), welche zukünftig auf eine Kapazität von 30.000 Mg/a ausgebaut werden soll (Kabbe, 2018) ■ z.Z. Pilotstudie für die Monoverbrennungsanlage Bitterfeld-Wolfen; bei erfolgreichem Verlauf soll großtechnische Anlage entstehen (Stand: Oktober 2018) (EUWID Wasser und Abwasser, 2018b)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens ist in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am sinnvollsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen ist ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt möglich.

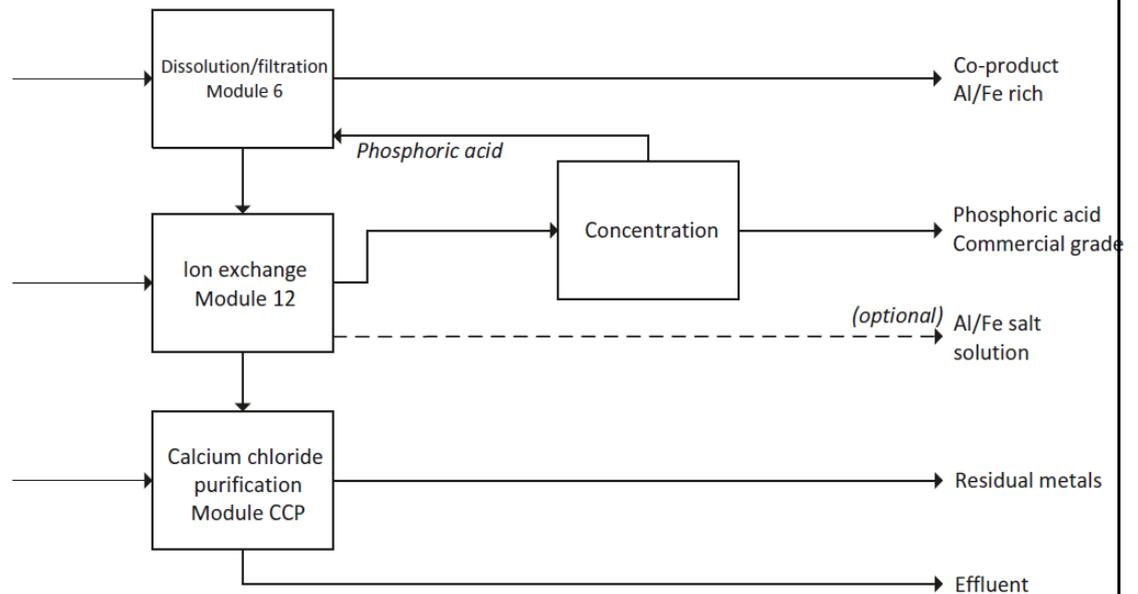
Ecophos®

Name des Verfahrens	Ecophos®
Unternehmen	Ecophos SA (Belgien)
Input	Klärschlammasche
Verfahrenstyp	nasschemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	75-90 % bezogen auf Klärschlammasche (Spörri et al., 2017)
Beschreibung	<p>Zwei Verfahrensführungen (Takhim et al., 2019):</p> <p>1.) Salzsäureprozess:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Klärschlammasche wird mit Salzsäure aufgeschlossen ■ Fest-Flüssig-Trennung von festen Verunreinigungen und phosphathaltiger Lösung ■ Phosphathaltige Lösung wird mit Kalk versetzt: Fällung von Di-Kalziumphosphat (DCP) ■ Fest-Flüssig-Trennung von DCP (fest) und schwermetallhaltiger Lösung ■ Schwermetallhaltige Lösung wird weiter behandelt (u.a. Abtrennung von Schwermetallen und Magnesium) mit Rückgewinnung von Salzsäure (Kreislaufführung) und Gips ■ DCP (marktfähiges Futtermittel) kann mit weiteren Behandlungsverfahren zu einer Vielzahl von phosphorhaltigen Dünge- oder Futtermitteln aufgearbeitet werden <p>2.) Phosphorsäureprozess:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Klärschlammasche wird mit Phosphorsäure aufgeschlossen ■ Fest-Flüssig-Trennung von phosphatarmer Festphase und phosphatreicher Flüssigphase ■ Flüssigphase: Abscheidung von Kationen (Al, Fe, Ca, Mg und Schwermetallen) durch Ionenaustauscher ■ Behandelte Flüssigkeit ist Phosphorsäure mit einer P₂O₅-Konzentration von etwa 25% ■ Durch Eindampfen der Phosphorsäure wird marktfähiges Produkt erhalten

1.) Salzsäureprozess:



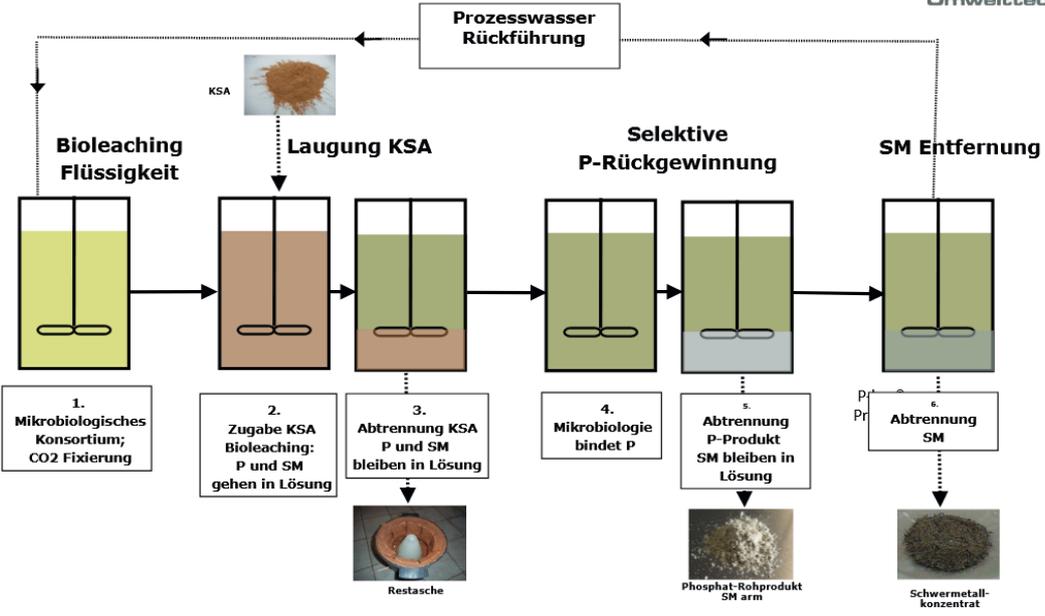
2.) Phosphorsäureprozess:



Quelle: Takhim et. al. (2019)

Phosphorprodukt	technische Phosphorsäure (75 %ig) (Adam, 2018)
Vorteile	Wirtschaftlich (Spörri et al., 2017)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ hoher Chemikalieneinsatz (Spörri et al., 2017) ■ Entsorgung von hohen, teilweise gefährlichen Abfallmengen (Spörri et al., 2017)
Entwicklungsstand	Großtechnisch umgesetzt (Takhim et. al., 2019)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens ist in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am sinnvollsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen ist ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt möglich.

INOCRE P-bac

Name des Verfahrens	INOCRE P-bac
Unternehmen	Fritzmeier Umwelttechnik GmbH & Co. KG
Input	Klärschlammasche
Verfahrenstyp	Bioleaching
Rückgewinnungsrate	80 % bezogen auf Klärschlammaschen (LfU, 2015)
Beschreibung	<p>Bertau et al. (2017):</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Schwefelsäure zur Phosphatlösung wird durch mikrobielle Oxidation von reduzierten Schwefelverbindungen bzw. elementarem Schwefel in einem Fermenter gebildet ■ Schwefelsäure und Bakterien werden mit Asche vermischt ■ Phosphor und Schwermetalle werden gelöst ■ Fest-Flüssig-Trennung ■ Durch Änderung der Milieubedingungen in der Lösung kommt es zu einer mikrobiell induzierten Ausfällung von Eisenphosphat. ■ Weiterverarbeitung des Eisenphosphats
Schematische Darstellung des Verfahrens	<div style="text-align: right;">  </div> <p style="text-align: center;">P-bac Verfahren</p>  <p>Quelle: DPP, 2018j</p>
Phosphorprodukt	Eisenaluminiumphosphat (DPP, 2018j)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ technologisch einfaches Verfahren (LfU, 2015) ■ hohe Rückgewinnungsrate (LfU, 2015) ■ Schwermetallabtrennung (LfU, 2015)
Nachteile	Voraussetzung: konstante Milieubedingungen (LfU, 2015)
Entwicklungsstand	<ul style="list-style-type: none"> ■ Pilotanlage in Großhelfendorf ■ z.Z. wird untersucht, wie das gewonnene Phosphorrekylat zu einem Düngemittel aufgearbeitet werden kann (Fraunhofer-ISC, 2017)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung bleibt abzuwarten. Die Verwendung des phosphorhaltigen Produkts muss abgesichert sein. Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens wäre direkt an den oder in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am wirtschaftlichsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen wäre ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt sinnvoll.

PARFORCE

Name des Verfahrens	PARFORCE
Unternehmen	PARFORCE Engineering & Consulting GmbH
Input	Klärschlammaschen, Phosphatabfälle, Struvit
Verfahrenstyp	nasschemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	>80% möglich bezogen auf Klärschlammaschen
Beschreibung	<p>Fröhlich und Hoffmann (2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> optional: Vorbehandlung des Aufgabematerials, z.B. thermische Behandlung von Struvit, um organische Verunreinigungen zu entfernen (Nutzung der Abwärme als Prozesswärme; anfallendes Ammoniak zur pH-Wert-Einstellung) Durch Reaktion des phosphathaltigen Aufgabematerials mit Salz- oder Salpetersäure im Laugungsreaktor werden die Phosphate in Lösung gebracht Die entstandene Aufschluss suspension wird in einer Zentrifuge fest-flüssig-getrennt; Rückstand (alkalisch aktivierter Binder, auch Geopolymer genannt) kann in der Bauindustrie verwendet werden Flüssigphase wird mit Di-(2-Ethylhexyl)Phosphorsäure (DEHPA) versetzt, um Aluminium und Eisen zu extrahieren (Wiedergewinnung von Fällmitteln) (Fröhlich et al., 2018) Die übrigen Ionen der Laugungslösung werden in der Elektrodialyse monoselektiv getrennt. Der Output der Elektrodialyse ist Rohphosphorsäure und ein Konzentrat aus Salzsäure, Calciumchlorid und Natronlauge. Rohphosphorsäure wird weiter aufkonzentriert (Mixer-Settler und Vakuumverdampfer) optional: Integrierte Säurerückgewinnung aus dem Konzentrat der monoselektiven Elektrodialyse; Gewinnung von Calciumhydroxid, Natriumchloridlösung (Kreislaufführung in der Elektrodialyse) und Salzsäure (Kreislaufführung für den Aufschluss im Laugungsreaktor) optional: nachgeschaltete Kristallisation des Konzentrats aus der monoselektiven Elektrodialyse (Nebenprodukt Calciumnitrat)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: verändert nach Fröhlich und Hoffmann (2018)</p>
Phosphorprodukt	technische Phosphorsäure (75 %ig) (Adam, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> Produkt (Phosphorsäure) unterliegt nicht der DÜMV Auch für Struvit anwendbar (erweiterter PARFORCE-Ansatz): Struvitprodukte der Phosphorrückgewinnungsverfahren müssen nicht als Düngemittel verwendet, sondern können in Phosphorsäure umgewandelt werden und sind somit universal in der Phosphorindustrie einsetzbar wenig Abfälle
Nachteile	Elektrodialyse ist sehr energieintensiv (Standortauswahl kann sich danach richten, wo überschüssiger Strom erzeugt wird)
Entwicklungsstand	<ul style="list-style-type: none"> Stand Januar 2019: Struvit wird im Rahmen des erweiterten PARFORCE-Ansatzes in einer mobilen Versuchsanlage in Hagenow (Mecklenburg-Vorpommern) durch das AirPrex-Verfahren (Zusammenarbeit mit CNP-Technology Water and Biosolids GmbH) in Kombination mit einer speziellen Klärschlammintegration (Zerkleinerung von Klärschlamm) erzeugt und danach zu Phosphorsäure verarbeitet (CNP, 2019) Das in der mobilen Versuchsanlage angewendete AirPrex-Verfahren ist im Vergleich zu dem großtechnisch erprobten AirPrex-Verfahren leicht abgewandelt: in einem zusätzlichen Reaktor werden Mikrokristalle erzeugt, die in den AirPrex-Reaktor zurückgeführt und abgetrennt werden; dadurch wird eine höhere Struvitausbeute erreicht (CNP, 2019)

**Bewertung
hinsichtlich
Einsatzfähigkeit**

Klärschlammasche-Ansatz:

- Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung bleibt abzuwarten. Die zukünftigen Anforderungen der AbklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens wäre direkt an den oder in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am wirtschaftlichsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen wäre ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt sinnvoll.

Erweiterter PARFORCE-Ansatz:

- Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung bleibt abzuwarten. Die zukünftigen Anforderungen der AbklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate für Kläranlagen mit Bio-P-Elimination und geringen P-Gehalten im Klärschlamm eingehalten werden. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und möglicher Alternativen muss der Einzelfall entscheiden, ob ein Einsatz sinnvoll ist.

PASCH

Name des Verfahrens	PASCH
Entwickler	RWTH Aachen
Input	Klärschlammasche
Verfahrenstyp	nasschemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	70–80 % bezogen auf KA-Zulauf (Egle et al., 2014), entspricht 78-89 % bezogen auf Klärschlamm/-asche
Beschreibung	<p>Pinnekamp et al. (2009):</p> <ul style="list-style-type: none"> chemischer Aufschluss der Aschen mit verdünnter Salzsäure Flüssig-Fest-Trennung Reinigung der Aufschlusslösung (Waschung und Schwermetallabtrennung) Fällung der Produkte (Calcium- und Magnesiumphosphate)
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Quelle: Pinnekamp et al. (2009)</p>
Phosphorprodukt	Calciumphosphate (Adam, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> hohe Rückgewinnungsrate (LfU, 2015) Schwermetallabtrennung, gegebenenfalls –rückgewinnung (LfU, 2015)
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> technologisch komplexes Verfahren (LfU, 2015) hoher Einsatz verschiedener Chemikalien (LfU, 2015) neue zu entsorgende Abfallströme (Steinmetz et al., 2014)
Entwicklungsstand	Technikumsanlage (Wittstock, 2018); großtechnische Umsetzung geplant in Straubing (LfU, 2015)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung bleibt abzuwarten. Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens wäre direkt an den oder in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am wirtschaftlichsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen wäre ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt sinnvoll.

Phos4Life

Name des Verfahrens	Phos4Life
Unternehmen	Técnicas Reunidas SA (TR) (Entwicklung in Zusammenarbeit mit der Stiftung Zentrum für nachhaltige Abfall- und Ressourcennutzung)
Input	Klärschlammasche
Verfahrenstyp	nasschemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	>95 % bezogen auf Klärschlammasche (AWEL, 2017)
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> nasschemischer Extraktion mit Schwefelsäure; Nebenprodukt (mineralische Rückstand) kann in Zementindustrie verwertet werden Flüssig-Flüssig-Trennung mittels Dampf und 32%iger Salzsäure: Trennung von Eisen(III)chloridlösung (kann als Fällmittel in KA eingesetzt werden), 17%ige Salzsäure, Metallkonzentrat (können beide stofflich verwertet werden) und Phosphorsäure (Morf, 2018) Phosphorsäure wird konzentriert mittels Dampf
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>Vereinfachtes Prozessschema des Phos4Life-Verfahrens</p> <p>Quelle: AWEL (2017)</p>
Phosphorprodukt	Phosphorsäure (74 %ig) (AWEL, 2017)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> vollständige Schwermetallentfrachtung (AWEL, 2017) Wiederverwendung und weitere Verwertung aller Nebenprodukte möglich (Morf, 2018)
Nachteile	Bisher fehlende Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (AWEL, 2018)
Entwicklungsstand	Pilotierung erfolgreich abgeschlossen, großtechnische Umsetzung steht aus (AWEL, 2018)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bleiben abzuwarten. Die zukünftigen Anforderungen der AbfKlärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens wäre direkt an den oder in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am wirtschaftlichsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen wäre ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt sinnvoll.

SeraPlant

Name des Verfahrens	SeraPlant (ehemals RecoPhos®)
Entwickler/ Unternehmen	<ul style="list-style-type: none"> ■ SeraPlant GmbH ■ Materialforschungs- und Prüfanstalt an der Bauhaus-Universität Weimar ■ Glatt Ingenieurtechnik GmbH
Input	Klärschlammasche
Verfahrenstyp	nasschemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	90 % (Egle et al., 2014; Montag et al., 2015), entspricht 100 % bezogen auf Klärschlamm/-asche
Beschreibung	<p>LfU, 2015:</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Aufschluss der Aschen mit Phosphorsäure, optional Schwefelsäure ■ ggf. Zugabe von weiteren Nährstoffen (Harnstoff, Kaliumsulfat, Ammoniumsulfat/-phosphat) ■ Homogenisierung und Trocknung
Phosphorprodukt	Aufgeschlossene phosphathaltige Klärschlammasche (Adam, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ technisch einfache Umsetzung (Montag et al., 2015) ■ geringer Energiebedarf (Montag et al., 2015) ■ Zugabe von Phosphorsäure führt zu einer Aufstockung des Phosphorgehaltes im Düngemittel (LfU, 2015) ■ keine Entsorgung von Reststoffen (LfU, 2015)
Nachteile	keine Schwermetallabtrennung, Aschen müssen Anforderungen der DüMV entsprechen (Montag et al., 2015)
Entwicklungsstand	<ul style="list-style-type: none"> ■ großtechnische Anlage (ehemals in Tangermünde – Kooperationsfirma insolvent) ■ kurzzeitig war eine großtechnische Umsetzung in Genthin geplant (Fleske, 2018) ■ Planung zum Bau einer Monoverbrennungsanlage in Halle-Lochau; Aschen sollen mit dem SeraPlant-Verfahren behandelt werden, um Phosphor rückzugewinnen (Plank, 2018)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbfklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Da keine Schwermetallabtrennung erfolgt, müssen DüMV-konforme Aschen als Ausgangsmaterial eingesetzt werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens ist in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am sinnvollsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen ist ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt möglich.

Substitution in der Düngemittelherstellung

Name des Verfahrens	Substitution in der Düngemittelherstellung
Input	Klärschlammasche
Verfahrenstyp	nasschemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	90 % bezogen auf KA-Zulauf (Egle et al., 2014), entspricht 100 % bezogen auf Klärschlamm/-aschen
Beschreibung	<ul style="list-style-type: none"> ■ Phosphaterze werden bei Mineraldüngerherstellung mit Klärschlammaschen teilsubstituiert (Egle et al., 2014) ■ nasschemischer Aufschluss erfolgt durch Schwefel oder Phosphorsäure, danach Pelletierung (Egle et al., 2014)
Phosphorprodukt	Phosphathaltiges Düngemittel
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ einfache Prozessführung (Egle et al., 2014) ■ keine Entsorgung von Abfallprodukten (Egle et al., 2014)
Nachteile	Keine Ausschleusung der Schwermetalle (Egle et al., 2014)
Entwicklungsstand	Großtechnisch umgesetzt (Egle et al., 2014)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Die zukünftigen Anforderungen der AbklärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Da keine Schwermetallabtrennung erfolgt, müssen DüMV-konforme Aschen als Ausgangsmaterial eingesetzt werden. Der Einsatz erfolgt in Düngemittelproduktionsanlagen. Es muss individuell geprüft werden, ob der Einsatz wirtschaftlich ist. Bei diesem Verfahren können besonders die zusätzlichen Transportkosten zwischen der Verbrennungsanlage und der Düngemittelproduktionsanlage ausschlaggebend sein.

TetraPhos®

Name des Verfahrens	TetraPhos®
Unternehmen	Hamburger Phosphorrecyclinggesellschaft mbH (Tochtergesellschaft von Remondis Aqua und Hamburg Wasser)
Input	Klärschlammasche
Verfahrenstyp	nasschemischer Aufschluss
Rückgewinnungsrate	86 % bezogen auf die Klärschlammasche (Rak, 2018)
Beschreibung	<p>Rak (2018):</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ Phosphatelution mit Phosphorsäure ■ Gipsfällung mit Schwefelsäure und Bildung von Phosphorsäure ■ Abtrennung von Eisen, Magnesium und Aluminium mit Ionenaustauschern ■ Regeneration der Ionenaustauscher mit HCl, HNO₃ und H₂SO₄ führt zu Metallsalzlösungen, die als Fällmittel in der chemischen P-Elimination eingesetzt werden können ■ Weitere Reinigung und Aufkonzentrierung (Vakuumverdampfung) der Phosphorsäure zur Rückführung und Ausschleusung des Überschusses als Produkt
Schematische Darstellung des Verfahrens	<p>REMONDIS (o. J.) aus Schurig (2018)</p>
Phosphorprodukt	Technische Phosphorsäure (75 %ig) (Adam, 2018)
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> ■ Kreislaufführung der Phosphorsäure (DPP, 2017) ■ Eisen- und Aluminiumsalze können als Fällmittel vermarktet werden (DPP, 2017) ■ Gips kann in der Bauindustrie eingesetzt werden (DPP, 2017)
Bemerkung	Limitierte Datengrundlage zur objektiven Einschätzung des Verfahrens
Entwicklungsstand	<ul style="list-style-type: none"> ■ Erfolgreiche Pilotierung in Hamburg (DPP, 2017) ■ Standort der Pilotanlage seit 2018 bei der Wirbelschichtfeuerungsanlage Elverlingsen (Rak, 2018) ■ Großtechnische Umsetzung ist geplant für das Jahr 2019 in Hamburg (Schurig, 2018)
Bewertung hinsichtlich Einsatzfähigkeit	Eine erfolgreiche großtechnische Umsetzung bleibt abzuwarten. Die zukünftigen Anforderungen der AbKlärV können auf Basis der Rückgewinnungsrate eingehalten werden. Ein Einsatz dieses Verfahrens wäre direkt an den oder in der Nähe der bestehenden und geplanten Monoverbrennungsanlagen in Sachsen-Anhalt am wirtschaftlichsten, um die Transportkosten der Aschen so gering wie möglich zu halten. Aufgrund dessen wäre ein Einsatz in Sachsen nur in der Nähe der gemeinsamen Grenze zu Sachsen-Anhalt sinnvoll.

Anhang 2 – Geografische Struktur der kommunalen Abwasserbeseitigung in Sachsen

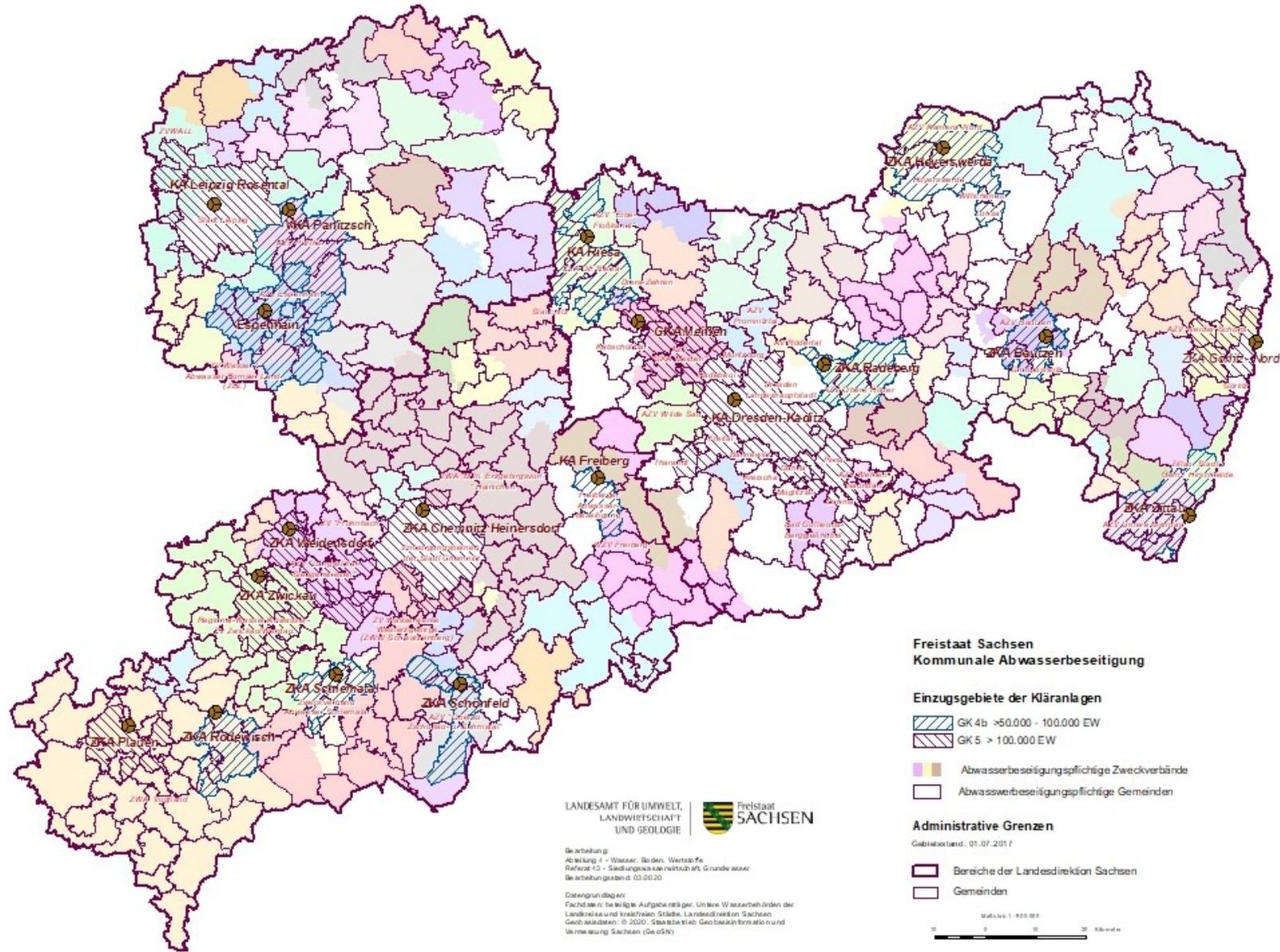


Abbildung 15: Geografische Struktur der kommunalen Abwasserbeseitigung in Sachsen

Anhang 3 – Satzungsrechtliche Regelungen der sächsischen örE zur Sammlung und Entsorgung von Klärschlämmen

örE	Zweckverbänden zugehörige Gebietskörperschaften	Ausschluss der Einsammlung und Beförderung	Ausschluss der Entsorgung	Bemerkung
Landeshauptstadt Dresden		Ja	Ja	
Zweckverband Abfallwirtschaft Westsachsen (ZAW)	Stadt Leipzig LK Leipzig	-	Nein	Nur zur Beseitigung
Stadt Leipzig		Ja	-	Ausschlussregelung Entsorgung wie ZAW
LK Leipzig		Ja	-	Ausschlussregelung wie ZAW
Regionaler Abfallverband Oberlausitz-Niederschlesien (RAVON)	LK Bautzen LK Görlitz	-	Nein	Nur zur Beseitigung
LK Bautzen		Ja	-	
LK Görlitz		Ja	-	
Zweckverband Abfallwirtschaft Oberes Elbtal (ZAOE)	LK Meißen LK Sächsische Schweiz-Osterzgebirge	Ja	Ja	
Zweckverband Abfallwirtschaft Südwestsachsen (ZAS)	LK Zwickau (nur Entsorgung) LK Erzgebirgskreis (Sammlung, teilweise Entsorgung)	Ja	Ja	
LK Zwickau		Ja	-	Ausschlussregelung Entsorgung wie ZAS
Abfallwirtschaftsverband Chemnitz (AWVC)	Stadt Chemnitz LK Mittelsachsen (teilweise) LK Erzgebirgskreis (Entsorgung nur teilweise)	-	Ja	
Stadt Chemnitz		Ja	-	Ausschlussregelung Entsorgung wie AWVC
LK Mittelsachsen		Ja	-	Ausschlussregelung Entsorgung wie AWVC
LK Nordsachsen		Ja	Ja	
LK Vogtlandkreis		Ja	Nein	Entsorgung in mechanisch-biologischer Abfallbehandlungsanlage möglich

Quelle: eigene Zusammenstellung

Herausgeber:

Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (LfULG)
Pillnitzer Platz 3, 01326 Dresden
Telefon: +49 351 2612-0
Telefax: +49 351 2612-1099
E-Mail: lfulg@smul.sachsen.de
www.lfulg.sachsen.de
Das LfULG ist eine nachgeordnete Behörde des
Sächsischen Staatsministeriums für Energie, Klimaschutz, Umwelt und
Landwirtschaft.

Autoren:

Jörg Wagner, Romana Richter, Karsten Struck, Roman Dinslage
INTECUS GmbH Abfallwirtschaft und umweltintegratives Management
Pohlandstr. 17, 01309 Dresden
Telefon: +49 351 31823-0
Telefax: +49 351 31823-33
E-Mail: intecus.dresden@intecus.de
www.intecus.de

Redaktion:

Stefan Zinkler, Dr. Astrid Arthen
LfULG Abteilung Wasser, Boden, Wertstoffe/Referat Wertstoffwirtschaft
Zur Wetterwarte 11, 01099 Dresden
Telefon: +49 351 8928-4100
Telefax: +49 351 8928-4199
E-Mail: Stefan.Zinkler@smul.sachsen.de, Astrid.Arthen@smul.sachsen.de

Fotos:

Bildquelle Titelblatt: Stadtentwässerung Dresden GmbH

Redaktionsschluss:

26.11.2020

Hinweis:

Die Broschüre steht nicht als Printmedium zur Verfügung, kann aber als PDF-Datei unter <https://publikationen.sachsen.de/bdb/> heruntergeladen werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wird von der Sächsischen Staatsregierung im Rahmen ihrer verfassungsmäßigen Verpflichtung zur Information der Öffentlichkeit herausgegeben.

Sie darf weder von Parteien noch von deren Kandidaten oder Helfern im Zeitraum von sechs Monaten vor einer Wahl zum Zwecke der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für alle Wahlen.

Missbräuchlich ist insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken oder Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist auch die Weitergabe an Dritte zur Verwendung bei der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die vorliegende Druckschrift nicht so verwendet werden, dass dies als Parteinahme des Herausgebers zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte.

Diese Beschränkungen gelten unabhängig vom Vertriebsweg, also unabhängig davon, auf welchem Wege und in welcher Anzahl diese Informationsschrift dem Empfänger zugegangen ist. Erlaubt ist jedoch den Parteien, diese Informationsschrift zur Unterrichtung ihrer Mitglieder zu verwenden.

*Täglich für
ein gutes Leben.*

www.lfulg.sachsen.de