



Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung in Bayern



abfall



Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung in Bayern

Impressum

Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung in Bayern

Herausgeber:

Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)

Bürgermeister-Ulrich-Straße 160

86179 Augsburg

Tel.: 0821 9071-0

E-Mail: poststelle@lfu.bayern.de

Internet: www.lfu.bayern.de/

Konzept/Text:

LfU, Referat 35

Redaktion:

LfU, Dr. Lars Zeggel

Bildnachweis:

Titelbild: Michael Eckardt, Stadtwerke Rödental,

Alle Grafiken: LfU

Druck:

Pauli Offsetdruck e.K.

Am Saaleschlößchen 6

95145 Oberkotzau

Gedruckt auf 100 % Recyclingpapier, zertifiziert nach dem „Blauen Engel“.

Auflage: 300 Exemplare

Stand:

Juli 2022

Diese Publikation wird kostenlos im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit der Bayerischen Staatsregierung herausgegeben. Jede entgeltliche Weitergabe ist untersagt. Sie darf weder von den Parteien noch von Wahlwerbenden oder Wahlhelfern im Zeitraum von fünf Monaten vor einer Wahl zum Zweck der Wahlwerbung verwendet werden. Dies gilt für Landtags-, Bundestags-, Kommunal- und Europawahlen. Missbräuchlich ist während dieser Zeit insbesondere die Verteilung auf Wahlveranstaltungen, an Informationsständen der Parteien sowie das Einlegen, Aufdrucken und Aufkleben parteipolitischer Informationen oder Werbemittel. Untersagt ist gleichfalls die Weitergabe an Dritte zum Zweck der Wahlwerbung. Auch ohne zeitlichen Bezug zu einer bevorstehenden Wahl darf die Publikation nicht in einer Weise verwendet werden, die als Parteinahme der Staatsregierung zugunsten einzelner politischer Gruppen verstanden werden könnte. Den Parteien ist es gestattet, die Publikation zur Unterrichtung ihrer eigenen Mitglieder zu verwenden.

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte sind vorbehalten. Die publizistische Verwertung der Veröffentlichung – auch von Teilen – wird jedoch ausdrücklich begrüßt. Bitte nehmen Sie Kontakt mit dem Herausgeber auf, der Sie – wenn möglich – mit digitalen Daten der Inhalte und bei der Beschaffung der Wiedergaberechte unterstützt.

Diese Publikation wurde mit großer Sorgfalt zusammengestellt. Eine Gewähr für die Richtigkeit und Vollständigkeit kann dennoch nicht übernommen werden. Für die Inhalte fremder Internetangebote sind wir nicht verantwortlich.



BAYERN | DIREKT ist Ihr direkter Draht zur Bayerischen Staatsregierung. Unter Tel. 089 12 22 20 oder per E-Mail unter direkt@bayern.de erhalten Sie Informationsmaterial und Broschüren, Auskunft zu aktuellen Themen und Internetquellen sowie Hinweise zu Behörden, zuständigen Stellen und Ansprechpartnern bei der Bayerischen Staatsregierung.

Inhaltsverzeichnis

1	Phosphorrückgewinnung – Hintergrund und europäischer Kontext	5
2	Die rechtlichen Rahmenbedingungen der Phosphorrückgewinnung	6
3	Klärschlamm kommunaler Kläranlagen in Bayern	7
3.1	Anzahl und Ausbaugröße kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen in Bayern	7
3.2	Das Klärschlammaufkommen bayerischer kommunaler Kläranlagen	8
3.3	Das Klärschlammaufkommen in den Kläranlagen einer jeweiligen Größenklasse in den kreisfreien Städten und Landkreisen	8
4	Die Verwertung des Klärschlamms in Bayern	10
5	Aspekte der Technologieauswahl	12
5.1	Behandlung von Klärschlamm	12
5.2	Behandlung von Klärschlammmasche	12
5.3	Die verfahrenstechnischen Prozesse während der Phosphorrückgewinnung	12
5.4	Phosphoraufschluss	13
5.5	Phosphatfällung	14
5.6	(Schwer)-Metallabtrennung	14
5.7	Reststoffbehandlung	15
5.8	Die alternativen thermischen Verfahren zur Klärschlammbehandlung	16
5.9	Berücksichtigung der gesamten Wertschöpfungskette	16
5.10	Tabellarische Übersicht wichtiger Kenngrößen der beschriebenen Verfahren	17
6	Klärschlammkooperationen – ein wichtiges Element für eine effiziente Verwertung	21
7	Weiterführende Informationen	22
7.1	Förderung interkommunaler Zusammenarbeit (RIZ) in Bayern (StMI)	22
7.2	Kommunalrichtlinie (bundesweit, BMU)	22
8	Verzeichnisse	23

1 Phosphorrückgewinnung – Hintergrund und europäischer Kontext

Rund 80 % des auf der Welt abgebauten Phosphaterzes werden für die Herstellung von Düngemitteln benötigt. Nach aktuellen Erhebungen besitzt allein Marokko (zusammen mit der Westlichen Sahara) 72,5 % der weltweiten Reserven an Phosphatgestein. In der Europäischen Union existieren, bis auf wenige Ausnahmen, wie z. B. Finnland, keine größeren, wirtschaftlich verwertbaren Phosphatlagerstätten, so dass man in der Europäischen Union (EU) nahezu vollständig auf Importe angewiesen ist.

Die zukünftig erschließbaren Erze sind zudem zunehmend mit Cadmium und Uran kontaminiert. Diese Schwermetalle finden sich in den phosphathaltigen Düngemitteln wieder. Dadurch wird eine weitere Aufreinigung erforderlich, die Preissteigerungen für entsprechende Produkte mit sich bringt.

Im Jahr 2012 wurde der letzte europäische Standort zur Produktion des für die chemische Industrie wichtigen weißen Phosphors (P₄) geschlossen. Somit ist die EU auch in diesem Bereich mittlerweile vollständig auf Importe angewiesen.

Dies hat dazu geführt, dass die Europäische Kommission Phosphatgestein 2014 auf die Liste der „Critical Raw Materials“ gesetzt hat. 2020 wurde in diese Liste auch elementarer, weißer Phosphor (P₄) aufgenommen.

In der Vergangenheit hat man in vielen Regionen, im Rahmen einer Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen, auf eine direkte Verwertung des Klärschlammes gesetzt. Da aber der Klärschlamm ebenso eine Senke für vielerlei Schadstoffe darstellt und die Ausbringung in vielen Fällen nicht im Sinne einer bedarfsgerechten Düngung erfolgte, hat sich Bayern bereits seit 2001 gegen eine landwirtschaftliche Verwertung ausgesprochen.

Nach Nr. 1.2.4 der Verordnung über den Abfallwirtschaftsplan Bayern (AbfPV) wird entsprechend dieser Zielvorstellung in Bayern ein Ausstieg aus der landwirtschaftlichen, landschaftsbaulichen und gärtnerischen Verwertung von Klärschlämmen zugunsten einer thermischen Verwertung mit Phosphorrückgewinnung angestrebt.

2 Die rechtlichen Rahmenbedingungen der Phosphorrückgewinnung

Mit der Novellierung der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) haben sich die Möglichkeiten der direkten landwirtschaftlichen Verwertung erheblich reduziert. Ab 2029 bzw. 2032 wird eine Rückgewinnung des Phosphors unter bestimmten Umständen für alle Kläranlagen verpflichtend.

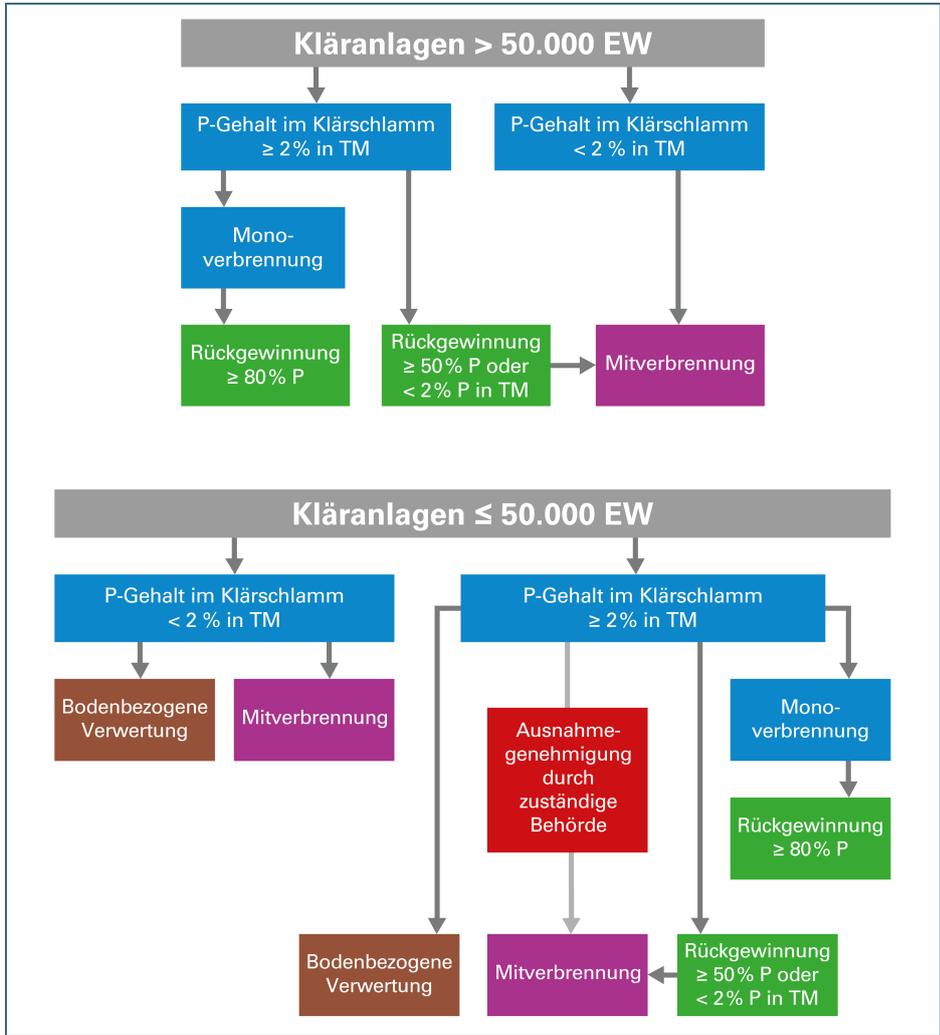


Abb. 1: Anforderungen an die Klärschlammherzeuger kommunaler Kläranlagen im Hinblick auf die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung ab dem 01.01.2032.

3 Klärschlamm kommunaler Kläranlagen in Bayern

3.1 Anzahl und Ausbaugröße kommunaler Abwasserbehandlungsanlagen in Bayern

In Bayern existieren derzeit 2.327 kommunale Abwasserbehandlungsanlagen (Stand 2020) [1]. Zahlenmäßig dominieren Anlagen kleinerer Ausbaugrößen bis zu 5.000 EW. Hinsichtlich der angeschlossenen Einwohner und damit hinsichtlich des behandelten Abwasservolumens bzw. Klärschlamm-aufkommens, sind vor allem große Kläranlagen mit über 10.000 EW relevant.

Tab. 1: Übersicht über Anzahl der Kläranlagen in der jeweiligen Ausbaugröße und ihre Anteile am Klärschlamm-aufkommen [1]

Größenklasse	Einwohnerwerte	Anzahl	Klärschlammmenge [Mg/a]
GK 1	< 1.000	1.047	2.600
GK 2	1.000–5.000	707	22.566
GK 3	5.001–10.000	211	16.726
GK 4	10.001–50.000	287	78.263
GK 4	50.001–100.000	39	27.067
GK 5	> 100.000	36	136.196
Summe		2.327	283.418

Fast die Hälfte der bayerischen kommunalen Kläranlagen kommen hinsichtlich ihrer Ausbaugröße auf weniger als 1.000 EW. Fast ein weiteres Drittel der Anlagen entsprechen einer Größe von 1.000 bis 5.000 EW. Im Gegensatz dazu haben die Kläranlagen, die aufgrund ihrer Ausbaugröße ab dem Jahr 2032 in jedem Fall einer Phosphorrückgewinnung unterliegen, wenn ihr Phosphorgehalt in der Klärschlamm-trockenmasse 2 % oder mehr beträgt, zahlenmäßig einen Anteil von lediglich 4 %. Wird die Phosphorrückgewinnung, wie ursprünglich angedacht, für alle Anlagen mit mehr als 10.000 EW verpflichtend, würde eine erhebliche Anzahl (12 %) an Anlagen hinzukommen.

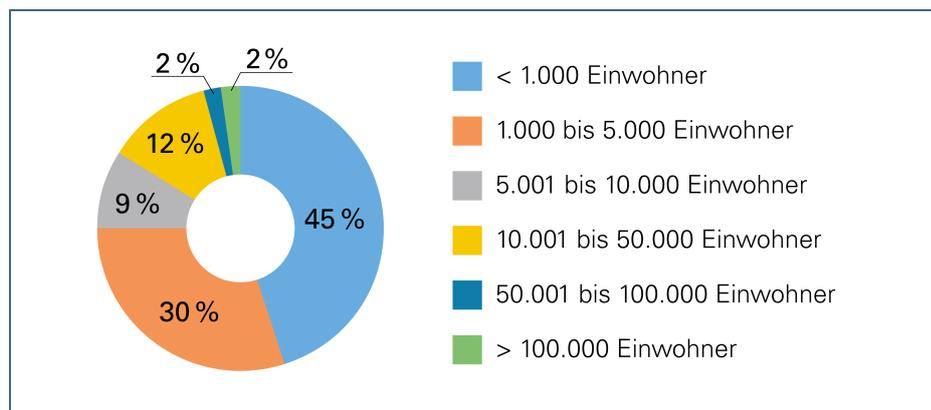


Abb. 2: Prozentualer Anteil von Kläranlagen in Abhängigkeit der Ausbaugröße von kommunalen Kläranlagen in Bayern [1]

3.2 Das Klärschlammaufkommen bayerischer kommunaler Kläranlagen

Die 36 Kläranlagen mit über 100.000 EW sind für fast die Hälfte des in Bayern entstehenden Klärschlammes verantwortlich. Während die Anlagen mit über 50.000 EW nur weitere 11 % des Klärschlammes produzieren, sind es bei denen zwischen 10.000 und 50.000 EW bereits 27 %.

In der Annahme, dass die Kläranlagen mit mehr als 50.000 EW durch die Phosphorelimination Klärschlamm mit mindestens 2 % Phosphor in der Trockenmasse produzieren, unterliegt ab dem Jahr 2032 voraussichtlich ein Anteil von 58 % des in Bayern anfallenden Klärschlammes der Verpflichtung einer Phosphorrückgewinnung. Bei Einbezug aller Kläranlagen mit mehr als 10.000 EW wären dies 85 % des gesamten bayerischen kommunalen Klärschlammes.



3.3 Das Klärschlammaufkommen in den Kläranlagen einer jeweiligen Größenklasse in den kreisfreien Städten und Landkreisen

Das Klärschlammaufkommen über die Ausbaugrößen hinweg ist innerhalb der bayerischen Landkreise und kreisfreien Städte unterschiedlich verteilt. Erwartungsgemäß verfügen die kreisfreien Städte fast durchweg über eine große zentrale Kläranlage mit mehr als 100.000 EW. In den Landkreisen wird das Klärschlammaufkommen von Kläranlagen mit 10.000 bis 100.000 EW dominiert. In nur wenigen Landkreisen überwiegt dabei der Anteil von Kläranlagen mit über 50.000 EW. Letztere unterliegen ab 2032 in jedem Fall der Pflicht zur technischen Rückgewinnung des Phosphors, wenn der Phosphorgehalt in der Klärschlamm-trockenmasse 2 % oder mehr beträgt.

In der Mehrzahl der Landkreise fällt der Klärschlamm vor allem in Anlagen mit maximal 50.000 EW an. Diese unterliegen nach derzeitigem Stand auch nach 2032 nicht der Phosphorrückgewinnungspflicht, wenn eine direkte landwirtschaftliche Verwertung erfolgt. Eine anderweitige Verwertung des Klärschlammes ohne Rezyklierung des Phosphors muss durch die zuständige Behörde im Einzelfall genehmigt werden. Darüber hinaus sind es in einzelnen Landkreisen vor allem kleine Kläranlagen mit weniger als 10.000 EW, in denen der Großteil des Klärschlammes anfällt.

Aus dieser unterschiedlichen Verteilung des Klärschlammaufkommens und der bisherigen Entsorgungswege, insbesondere in den Landkreisen, resultieren unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich einer Umsetzung von Konzepten zur Phosphorrückgewinnung.

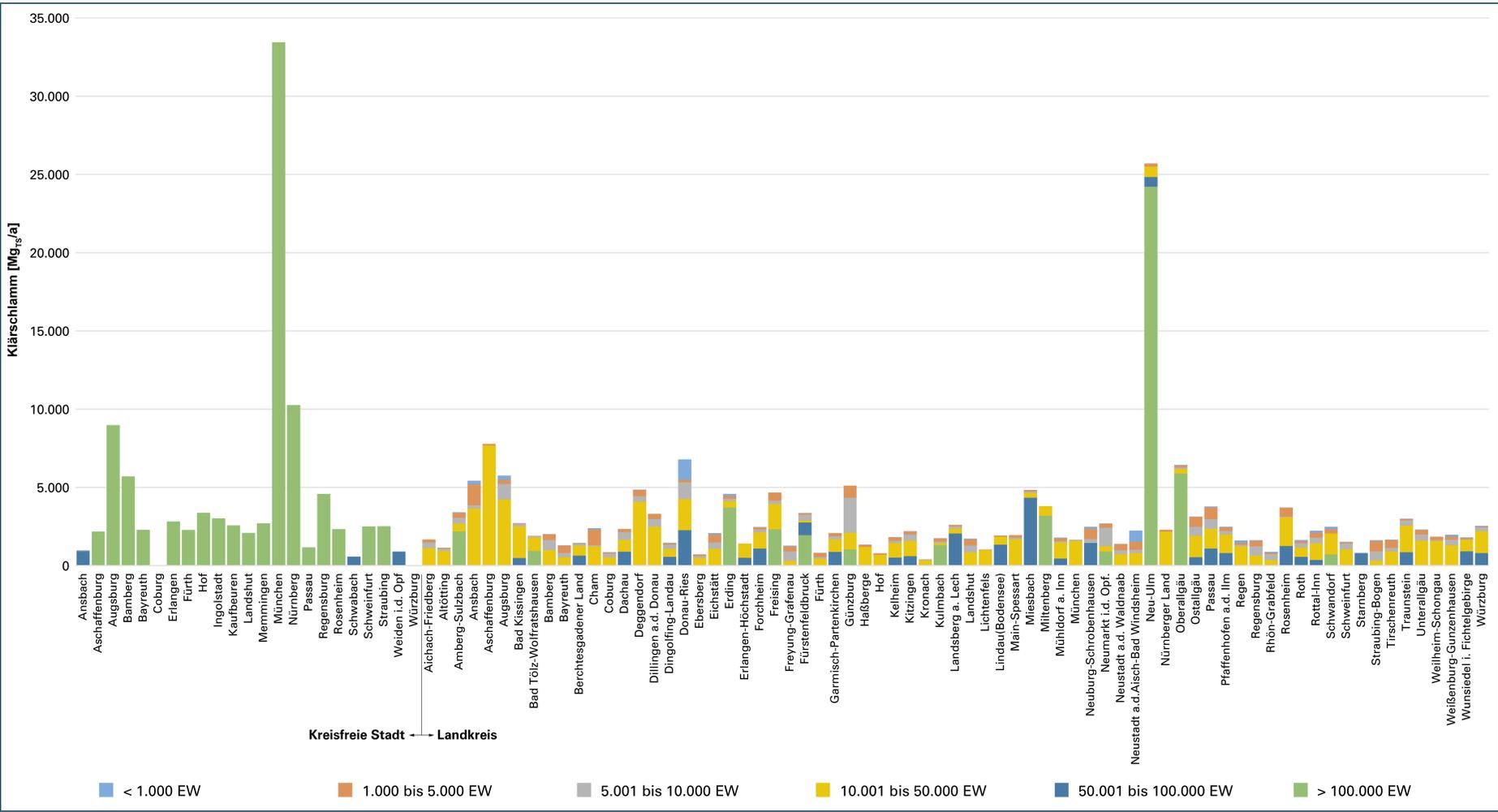


Abb. 4: Das kommunale Klärschlammaufkommen in den einzelnen Landkreisen und kreisfreien Städten in Abhängigkeit der Ausbaugröße der Kläranlagen.

4 Die Verwertung des Klärschlammes in Bayern

Im Hinblick auf eine zukünftige, sichere Klärschlamm Entsorgung sind neben den in Betrieb befindlichen Monoverbrennungsanlagen für Klärschlamm zahlreiche neue Anlagen in Planung. Die Gesamtkapazität der in Betrieb befindlichen, wie der geplanten Anlagen, deckt das bayerische Klärschlamm-aufkommen gerade ab. Überkapazitäten sind, bezogen auf das Klärschlamm-aufkommen und seine Monoverbrennung in Bayern somit derzeit nicht zu erwarten.

Art der Verwertung	Klärschlamm-menge [Mg _{TS/a}]
Thermisch	225.055
Landwirtschaftlich	32.300
Sonstige (Landbau und Rekultivierung)	26.063
Summe	283.418

Tab. 2:
Verwertung des in Bayern anfallenden kommunalen Klärschlammes [1]

Der Anteil des thermisch verwerteten Klärschlammes in Bayern ist mit 80 % recht hoch. Ein erheblicher Teil davon wird jedoch in der Mitverbrennung oder außerhalb Bayerns entsorgt. Der Anteil des in Bayern monoverbrannten Klärschlammes ist derzeit noch mit rund 33 % deutlich geringer.

Anlage	Zustand	Kapazität [Mg _{TS/a}]
München	in Betrieb	35.000
Altenstadt	in Betrieb	35.000
Neu-Ulm	in Betrieb	10.900 [2]
Mallersdorf-Pfaffenberg	in Bau	13.000
Straubing	genehmigt	40.000
Großheirath	geplant	12.000
Schweinfurt	geplant	9.000
Nürnberg	geplant	30.000
Ingolstadt	geplant	15.000
Augsburg/Gersthofen	beantragt	27.000
Zolling	geplant	30.000
Summe		256.900

Tab. 3:
In Betrieb befindliche und geplante Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Bayern.

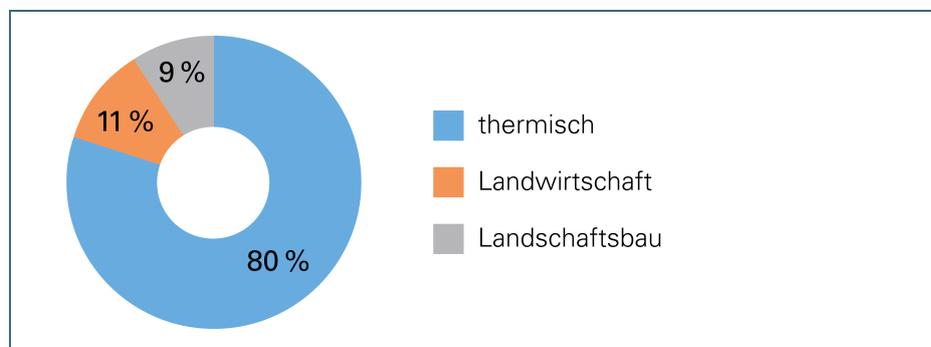


Abb. 5:
Anteile der Verwertungsform des in Bayern anfallenden kommunalen Klärschlammes [1].

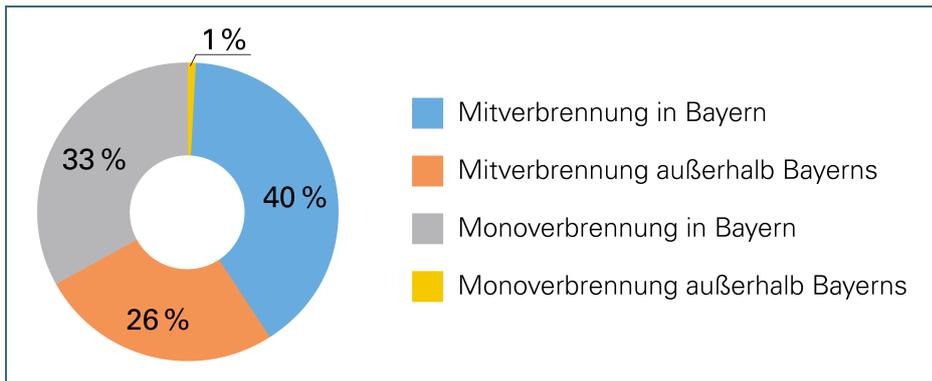


Abb. 6:
Formen der thermischen Verwertung des 2020 in Bayern angefallenen kommunalen Klärschlammes [1].

5 Aspekte der Technologieauswahl

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, den Phosphor sowohl im Klärschlamm als auch in der Klärschlammasche zurück zu gewinnen.

5.1 Behandlung von Klärschlamm

Eine Rückgewinnung aus dem Klärschlamm ist insbesondere für kleine Kläranlagen mit den derzeit zur Verfügung stehenden Technologien i. d. R. zu aufwendig. Gegebenenfalls kann für größere Kläranlagen eine P-Rückgewinnung mit P-Gehalten knapp über 2 % in der TM in Frage kommen. Dabei ist im Vorfeld sicherzustellen, dass die erforderlichen Rückgewinnungsraten erreicht werden.

5.2 Behandlung von Klärschlammasche

Für große Kläranlagen und Zweckverbände sowie Anlagen mit chemischer P-Elimination und hohen Phosphorgehalten im Schlamm bieten sich vor allem die zentrale Monoverbrennung und anschließende P-Rückgewinnung aus der Klärschlammasche an.

5.3 Die verfahrenstechnischen Prozesse während der Phosphorrückgewinnung

Die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche, sowohl die thermochemische als auch die nasschemische Behandlung, ist ein technologisch umfangreicher Prozess. Dieser lässt sich vor allem an Orten mit guter Anbindung an vorhandene Industriestandorte und Verkehrsstrassen realisieren.

Die Phosphorrückgewinnung beinhaltet einige grundlegende Prozessschritte, die je nach Verfahren alleine oder in Kombination und in Variation ihrer Ausführung zur Anwendung kommen und im Folgenden unabhängig vom speziellen Verfahren erläutert werden.

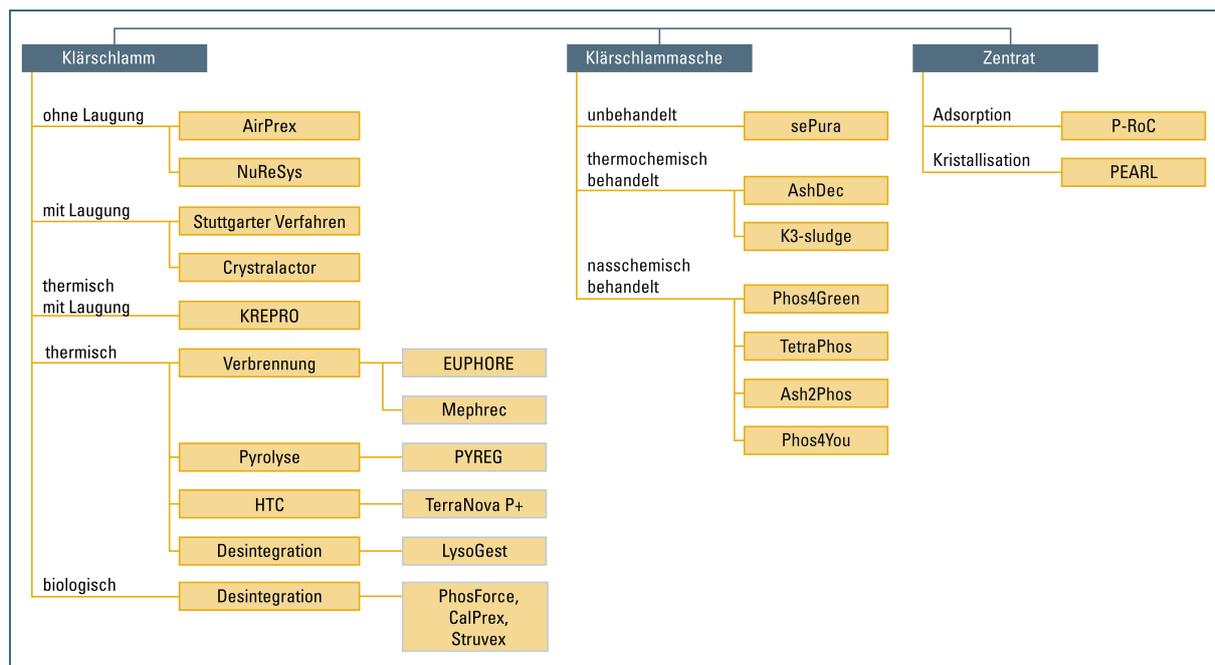


Abb. 7: Übersicht über eine Vielzahl von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung.

Die Wirtschaftlichkeit der Verfahren hängt in einem erheblichen Maße vom P-Gehalt der Asche und den Schwermetallgehalten und der sich daraus ergebenden Notwendigkeit einer Abreicherung ab.

5.4 Phosphoraufschluss

Im Klärschlamm liegt rund ein Drittel des Phosphors in gelöster Form vor. Zur Erreichung zufriedenstellender Rückgewinnungsraten bei der Behandlung von Klärschlamm ist es erforderlich, den Anteil des gelösten Phosphors zu erhöhen. Nur dieser steht für eine spätere Fällung und Abtrennung und damit für eine Rückgewinnung zur Verfügung.

In der Klärschlammasche liegt der Phosphor ebenfalls in einer schwer löslichen mineralischen Form vor. Bei der Behandlung von Klärschlammasche dient Säure zum Lösen des Phosphors. Dabei kann der gelöste Phosphor im Zuge einer Trocknung der Asche direkt wieder ausgefällt werden. Er verbleibt dann mit allen anderen, zwischenzeitlich in Lösung gegangenen Inhaltsstoffen wie Schwermetallen in der Asche, liegt nun allerdings in einer pflanzenverfügbaren Form vor. Für die Gewinnung reinerer Phosphorverbindungen wird der gelöste Phosphor abgetrennt und in weiteren Prozessschritten separat ausgefällt.

Im Klärschlamm, wie auch in der Asche wird die Rücklösung über eine Absenkung des pH-Wertes durch Säuren erreicht. Hier kommt meist Schwefelsäure zum Einsatz. Bei der Behandlung von Klärschlammasche werden auch Phosphorsäure oder Salzsäure verwendet.

Wird auf der Kläranlage anstelle der Phosphatfällung die biologische Phosphorelimination (Bio-P) angewandt, kann bei insgesamt niedrigen Phosphatgehalten eine ausreichende Abreicherung im Klärschlamm durch Rücklösung und Ausfällung auch ohne chemische Verfahren erreicht werden.

Die Säuren werden gewöhnlich in konzentrierter Form vorgehalten und auf das nötige Maß verdünnt. In einem Fall der Aschelaugung wird auf die Herstellung von Schwefelsäure durch schwefeloxidierende Bakterien als Bestandteil des Verfahrens zurückgegriffen. Ein weiteres schlammbasiertes Verfahren nutzt Kohlenstoffdioxid (Kohlensäure) zur Absenkung des pH-Wertes.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, in einem der Faulung vorgeschalteten Behälter eine Vorversäuerung durchzuführen. Dabei entstehen verschiedene organische Säuren, wie Essig-, Propion- oder Buttersäure, die zu einer Absenkung des pH-Wertes führen.

Zur Freisetzung des Phosphors aus den Zellen der Biomasse kann der Klärschlamm zudem durch eine thermische Behandlung aufgeschlossen werden. Darüber hinaus untersucht man auch den mechanischen Aufschluss mittels Druck, feiner Düsen oder Ultraschall.

Die Säure mit den gelösten Inhaltsstoffen wird über eine Fest-Flüssig-Trennung separiert. Dadurch wird es möglich, den Phosphor oder auch die Schadstoffe getrennt voneinander und in gewünschter Form auszufällen.

Eine weitere Möglichkeit bietet die thermochemische Umwandlung des Phosphors in Klärschlamm und Klärschlammasche. Unter Zugabe verschiedener Salze wandelt sich der in der Asche als Apatit vorliegende Phosphor in Abhängigkeit des verwendeten Salzes in entsprechende pflanzenverfügbare Formen um.

Bei der hydrothermalen Karbonisierung (HTC) wird mechanisch entwässerter Klärschlamm unter Ausschluss von Sauerstoff, bei Temperaturen um 200 °C erhitzt. Der Druck ist abhängig von der Temperatur und liegt zwischen 10 und 40 bar. Bei diesem Prozess werden organische Verbindungen abgebaut, wobei flüchtige Substanzen entweichen, der Kohlenstoff zurückbleibt und sich entsprechend anreichert.

Als Produkte der HTC von Klärschlamm bleiben das Karbonisat (die Kohle), verschiedene Gase und ein wässriger Überstand zurück. In diesem befinden sich neben einem Großteil des Phosphors auch hohe Gehalte an Stickstoff und ein hoher chemischer Sauerstoffbedarf (CSB). Ein erheblicher Anteil liegt dabei als refraktärer, biologisch nicht abbaubarer CSB vor.

Die Pyrolyse ist ebenfalls ein thermochemischer Umwandlungsprozess, der unter limitiertem Angebot oder dem Ausschluss von Sauerstoff stattfindet. Sie setzt getrocknetes Inputmaterial voraus und die Temperaturen sind mit 500 bis 1.000 °C deutlich höher als bei der HTC. Als Produkte entstehen ein Karbonisat sowie Synthesegas und ein Kondensat (Pyrolyseöl). Die letzteren beiden werden teilweise innerhalb des Verfahrens unter oxidativen Bedingungen und höheren Temperaturen (> 1.000 °C) nachverbrannt. Die Anteile von Kohle, Gas und Kondensat variieren mit der Temperatur und der Verweilzeit in der Pyrolyseeinheit.

5.5 Phosphatfällung

Grundlage für die Ausfällung des rückgelösten Phosphors ist die Anhebung des pH-Wertes. Bei der P-Rückgewinnung im Schlammfad geschieht dies meist durch die Zugabe von Natronlauge. Da viele Verfahren in diesem Bereich auf die Generierung von Magnesiumammoniumphosphat (MAP) abzielen, wird zusätzlich eine Magnesiumverbindung hinzugegeben.

Andere Verfahren nutzen Calciumsalze oder Calciumsilikathydrate (CSH). Bei basisch reagierenden Verbindungen kann unter Umständen auf die Natronlauge zur Anhebung des pH-Wertes verzichtet werden. Im einfachsten Falle wird die Anhebung des pH-Wertes vor einer Fest-Flüssig-Trennung durch das Einblasen von Luft in den Faulbehälter erreicht. Dabei wird Kohlenstoffdioxid ausgetrieben und das auskristallisierte MAP über einen Hydrozyklon abgetrennt.

Die Laugung von Klärschlammmasche findet bei sehr niedrigen pH-Werten von unter drei, teilweise erheblich darunter, statt. Dies bedingt einen entsprechenden (unter Umständen überstöchiometrischen) Einsatz von Fällmitteln. Als Fällungsprodukte entstehen neben den gewünschten Phosphorverbindungen oft auch entsprechende Eisen- und Aluminiumphosphate, die als Düngemittel nicht und zur Weiterverarbeitung nur eingeschränkt zu verwerten sind.

Durch das Einbringen des Calciums in Anwesenheit der Schwefelsäure fallen zudem bedeutende Mengen Gips an. Ein wichtiger Punkt dabei ist die Vermeidung der Ausfällung von Eisen- und Aluminiumphosphaten sowie die selektive Abtrennung des Calciumphosphats vom Gips.

Ein Verfahren, das die mikrobiologisch generierte Schwefelsäure zur Laugung nutzt, fällt das Eisenphosphat mit Hilfe der Mikroorganismen aus. Somit entfällt dort die Zugabe zusätzlicher Chemikalien.

Alternativ kann auf eine Fällung des Phosphates verzichtet werden und dieses flüssig als Phosphorsäure (H₃PO₄) rückgewonnen werden. Hier ist dann, in Abhängigkeit der gewünschten Säurequalität, entsprechender Aufwand bei der Aufkonzentration und Aufreinigung der Säure zu betreiben.

5.6 (Schwer)-Metallabtrennung

Die MAP-basierten Verfahren benötigen in der Regel keine Schwermetallabtrennung, da diese im Abwasser nicht gelöst vorliegen und relativ gering konzentriert sind. Zudem kristallisiert das MAP als Mineral praktisch ohne den Einbau von Fremdionen aus. Teilweise wirken allerdings Eisen- oder Aluminiumverbindungen aus der P-Elimination störend und werden durch Zitronensäure komplexiert und somit am Ausfallen gehindert.

Bei der Phosphorrückgewinnung aus Asche werden hingegen neben Phosphor erhebliche Mengen an Schwermetallen in Lösung gebracht oder liegen in erhöhten Konzentrationen in der Asche vor. Daher ist bei einer Fällung des Phosphats verstärkt auf eine Separierung der Schadstoffe zu achten. Außerdem muss bei einer Fällung des rückgelösten Phosphors eine Entstehung von Eisen- und Aluminiumphosphat verhindert werden, da diese Verbindungen gegenüber Calciumphosphat schlechtere Pflanzenverfügbarkeit aufweisen.

Vor allem bei der Rückgewinnung des Phosphors als Phosphorsäure werden bezüglich der Kontaminanten höhere Anforderungen an die Qualität gestellt. Zur gezielten Entfernung der Schwermetalle werden unter anderem Sulfide oder poly-Sulfide verwendet, bei deren Handhabung besondere Anforderungen zu beachten sind.

Ebenfalls seit langem etabliert im Bereich der chemischen Industrie ist die Flüssig-Flüssig-Extraktion. Dabei wird die mit Schwermetallen befrachtete, wässrige Lösung in einer „mixing zone“ mit einem organischen Lösungsmittel zusammengebracht. Die im wässrigen Milieu gelösten Schwermetalle gehen dabei in das organische Lösungsmittel über. In einem Absetzbereich, der „settler zone“ entmischen sich beide Flüssigkeiten und werden voneinander getrennt. Das organische Lösungsmittel wird zur Wiederverwendung regeneriert, indem die Schwermetalle entfernt werden. Die wässrige Phase mit dem gelösten Phosphor gelangt weiter zur Aufbereitung, wie der Fällung des Phosphats oder der weiteren Aufreinigung und Aufkonzentration zu Phosphorsäure.

Andere Verfahren nutzen thermochemische Prozesse, um Schwermetalle aus der Asche oder auch aus dem Klärschlamm zu entfernen. Dabei werden der Asche oder dem Schlamm vorher Salze (z. B. Chloride) hinzugefügt, die mit den Schwermetallen relativ flüchtige Verbindungen bilden. Außerdem werden in einer ersten Stufe der Verbrennung reduzierende Bedingungen geschaffen. Im Falle der Aschebehandlung wird dazu ein Anteil unverbrannten Klärschlammes hinzugegeben. Asche und Additive werden in einem Drehrohr auf ca. 1.000 °C erhitzt.

Diese Methoden kommen in Verfahren zum Einsatz, bei denen der gesamte mineralische Anteil der Asche in das Düngemittel überführt wird. Die Schwermetalle, insbesondere Cadmium, Quecksilber, Arsen sowie Blei, gehen dabei zu unterschiedlichen Anteilen in die Gasphase über und werden dadurch in der Asche abgereichert. Die Schwermetalle reichern sich in den Stäuben der Rauchgasfiltereinheiten an.

5.7 Reststoffbehandlung

Die Entstehung und Handhabung von Reststoffen der jeweiligen Verfahren wurde in der Entwicklungsphase oftmals nur am Rande betrachtet. Sie stellen jedoch, insbesondere bei der großtechnischen Umsetzung und bei Betrieb in Vollstrom, wichtige Faktoren im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und technische Machbarkeit dar.

Bei der Laugung von Klärschlammaschen bleibt ein mineralischer, von Phosphor abgereicherter Rückstand übrig. Wenngleich er sich um die Menge an herausgelösten Anteilen reduziert, sind die physikochemischen Eigenschaften der Restasche, beispielsweise durch die Säurebehandlung, ungünstig beeinflusst. Dies kann einerseits durch den niedrigen pH-Wert selbst oder aber ein durch ihn geändertes Schadstofffreisetzungsverhalten bedingt sein und zu einer Einordnung in eine höhere Deponiekategorie führen. Zur Abhilfe kann Kalk beigemischt werden, was den Verfahrensaufwand erhöht und wiederum zu einer Mengenzunahme an Reststoffen führt.

Zur Laugung von Klärschlammaschen ist zudem eine erhebliche Menge an verdünnter Säure nötig, um eine handhabbare Suspension herzustellen. Nach der Ausfällung des Phosphats bleibt ein Prozesswasser zurück, das einer Aufbereitung bedarf, um es wiederverwenden zu können. Wird nach der

Laugung mit Schwefelsäure Calciumhydroxid oder Calciumoxid verwendet, entstehen erhebliche Mengen an Gips, die abgetrennt und für eine weitere Verwertung konditioniert werden müssen.

Eventuell müssen das Eisen und das Aluminium aus dem Prozesswasser entfernt werden. Hier kommen Ionenaustauscherharze zum Einsatz. Sie sind über Salzsäure regenerierbar. Dadurch entstehen Eisen- und Aluminiumchloridlösungen, die sich wieder als Fällmittel zur P-Elimination eignen.

Bei der sauren Laugung von Klärschlamm ist darauf zu achten, dass der Klärschlamm auch bei einer Behandlung des Gesamtstroms einer weiteren Verwertung (Mitverbrennung) zugeführt werden kann. Das Zentrat sollte nach Ausfällung des Phosphats direkt zurück in den Klärprozess gelangen. Hierbei ist vor allem eine mögliche Anreicherung gelöster Schwermetalle zu beachten.

Bei HTC-Prozessen ist das Abwasser durch seinen extrem hohen CSB problematisch. Zwar wird durch eine Rückführung in die Faulung einerseits der Biogasertrag erhöht, andererseits hat der nicht abbaubare Anteil des CSB negative Auswirkungen auf den CSB im Ablauf der Kläranlage.

5.8 Die alternativen thermischen Verfahren zur Klärschlammbehandlung

Neben der seit vielen Jahren etablierten Verbrennung von Klärschlamm in Feuerungsanlagen mit stationärer Wirbelschicht werden zunehmend sogenannte alternative Verfahren zur thermischen Verwertung am Markt angeboten. Diese umfassen im Wesentlichen die Pyrolyse und die hydrothermale Karbonisierung (HTC). Auch wenn die Karbonisierungsprozesse der Verfahren im Klärschlamm selbst zufriedenstellend ablaufen, bergen die Anlagen hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und den Anforderungen an den Immissionsschutz oftmals Schwierigkeiten. So unterliegen auch kleine dezentrale Pyrolyseanlagen der 17. BImSchV. Dadurch ist der Aufwand hinsichtlich Messtechnik zur Überwachung der Anlage im Verhältnis zur Anlagengröße überdurchschnittlich hoch. Bei der HTC stellt vor allem das stark mit schwer abbaubaren organischen Substanzen belastete Prozesswasser ein Problem dar. Unbehandelt kann es oft nicht in die Kläranlage rückgeführt werden und bedarf so einer zusätzlichen Behandlung. Beiden Verfahrensgattungen ist gemein, dass ihre Karbonisate nicht als Düngemittel zugelassen sind. Somit bedarf es einer anschließenden Abtrennung und Rückgewinnung des Phosphors.

In neueren Entwicklungen der Pyrolyse von Klärschlamm werden die entstehenden Pyrolyseöle und -gase zu Wasserstoff oder Kraftstoffen umgewandelt. Dies könnte eine zusätzliche Möglichkeit der Wertschöpfung bieten. Allerdings befinden sich die derzeitigen Anlagen noch in Versuchsmaßstab. In Bayern laufen derzeit dazu erste Pilotvorhaben. Im Falle einer erfolgreichen Umsetzung ist der Aufbau einer großtechnischen Anlage geplant. Auch hier ist eine zentrale Anlage mit geeigneter umgebender Infrastruktur (z. B. an einer Raffinerie), die den Klärschlamm aus einer größeren Region zentral zusammenführt, Voraussetzung für einen wirtschaftlichen Betrieb.

5.9 Berücksichtigung der gesamten Wertschöpfungskette

Bei der Wahl eines Rückgewinnungsverfahrens sind die gesamte Prozesskette sowie die jeweiligen Randbedingungen zu betrachten. Dies sind unter anderem die chemische Zusammensetzung des Klärschlammes (oder der Klärschlämme innerhalb eines Konsortiums) und der verfahrenstechnische Aufwand (Investitionen, Platz, Zugang zu Betriebsmitteln).

Besonderes Augenmerk ist zudem auf die Verwertungs- bzw. Entsorgungsmöglichkeiten und Kosten von Reststoffen (z. B. der gelaugten Restasche) zu legen. Die Produkte (z. B. Dünger oder Phosphorsäure) müssen den entsprechenden rechtlichen Vorgaben und/oder Industriestandards genügen, um Zugang zum Markt und Akzeptanz bei potenziellen Abnehmern zu erhalten.

5.10 Tabellarische Übersicht wichtiger Kenngrößen der beschriebenen Verfahren

Die folgenden Tabellen (vgl. Tab. 4 bis Tab. 6) geben eine Übersicht über die wesentlichen Eckpunkte der im Bericht beschriebenen Verfahren. Insbesondere bei den Angaben zum Energie- und Platzbedarf, sowie zu Kosten der Implementierung wurde auf sekundäre Literaturquellen verwiesen ([3] bis [15]). Hier ist zu beachten, dass eine Mehrheit der Untersuchungen aus der Schweiz und Österreich kommen und somit unter Umständen nur eingeschränkt auf deutsche und bayerische Verhältnisse zu übertragen sind.

Die angegebenen Datenquellen umspannen zudem einen relativ großen Zeitraum von bis zu 10 Jahren. In dieser Zeit können sich die Technologien sowohl hinsichtlich der Verfahrensweise, wie auch hinsichtlich der Kosten und der Anwendbarkeit verändert haben. So wurden (und werden) in den Verfahren Betriebsmittel zur chemischen Behandlung der Phosphorverbindungen geändert. Ebenso wandeln sich die Preise für Betriebsmittel und Energie sowie die rechtlichen Anforderungen an Düngemittel oder den Immissionsschutz.

Zu beachten ist auch, dass bei den Angaben die Systemgrenzen unterschiedlich weit gefasst sind. Teilweise sind die Betrachtungen an die Bedingungen eines bestimmten Anlagenstandortes und die dortige Infrastruktur gebunden.

Dennoch vermitteln die Tabellen eine Übersicht über die Komplexität, Anforderungen und Einsatzbereiche der beschriebenen Verfahren.

Tab. 4: Übersicht über den Verfahrenstyp, die wichtigsten Prozessschritte und die dafür vorgesehenen Betriebsmittel.

Verfahren	Verfahrenstyp	Laugung/Konvertierung	P-Fällung	SM-Abtrennung	Weitere
Ash2®Phos	Aschelaugung	HCl H ₂ SO ₄	Ca(OH) ₂	Na ₂ S	div. org. Lösungsmittel für Solvent Extraktion
Phos4Life	Aschelaugung	H ₂ SO ₄	keine	Kalk Abtrennung des Fe (+Al?) über Solvent Extraktion	div. org. Lösungsmittel für Solvent Extraktion HCl
Terra Nova® Ultra	hydrothermale Carbonisierung	HNO ₃	Calciumsilikathydrat	Nicht erforderlich	H ₂ SO ₄
TetraPhos®	Aschelaugung	H ₃ PO ₄ (prozessintern generiert)	keine	CaS _x	H ₂ SO ₄ Ionenaustauscherharze HCl
Phos4Green®	Chemische Aschebehandlung	H ₃ PO ₄	keine	keine/wird untersucht	keine
K3-sludge®	thermochemische Aschebehandlung	CaCO ₃	keine	thermisch/physikalisch	optional Umwandlung des Rezyklats mittels Säure
EuPhoRe®	thermochemische Aschebehandlung	(Erd-)alkalichloride/-sulfate bis 3 %	keine	(Erd-)Alkalichloride/-sulfate bis 3 %	keine
P-bac®	Aschelaugung	elementarer Schwefel (+Nähstoffe für Bakterien)	mikrobiell induziert	mikrobiologische Separierung	keine
AshDec®	thermochemische Aschebehandlung	Na ₂ CO ₃ /NaHCO ₃ getr. Klärschlamm (bis 10 %), O ₂	keine	thermochem. unter red. Bedingungen	Ca(OH) ₂ oder MgCO ₃ /NaHCO ₃ für Rauchgasreinigung
AirPrex®	Schlammbehandlung	keine	MgCl ₂	nicht erforderlich	keine
CalPrex® PhosForce® Struvex®	Schlammbehandlung	KS-Hydrolyse durch mikrobielle Versäuerung oder thermisch	Ca- oder Mg-Salze	nicht erforderlich	teilweise NaOH
PYREG®	Pyrolyse	thermisch	keine	keine	keine
P-RoC®	Zentratbehandlung	optional Hydrolyse des KS	Calciumsilikathydrat	nicht erforderlich	keine

Tab. 5: Übersicht über die Rückgewinnungsprodukte, die Rückgewinnungsrate und Reststoffe der beschriebenen Verfahren.

Verfahren	Rückgewinnungsprodukt	Rückgewinnungsrate	Rückgewinnung weiterer Produkte	Reststoffe (Abfall)
Ash2®Phos	Je nach Verfahrensauslegung $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$, $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH})$, H_3PO_4	> 80 %	je nach Verfahrensauslegung FeCl_3 , $\text{Al}(\text{OH})_3$ Gips, Sand	je nach Verwertbarkeit der Reststoffe bis 0,4 Mg/Mg KS_{TS} [4]
Phos4Life	H_3PO_4	> 80 %	FeCl_3 -Lösung als Fällmittel	Restasche angereichert mit Gips, Schwermetallkonzentrat
Terra Nova® Ultra	Calciumphosphat an CSH	60-80 %	Karbonisat zur Mitverbrennung	Prozesswasser mit schwer abbaubarem CSB
TetraPhos®	H_3PO_4	> 80 %	Gips Fe/AlCl_3 evtl. Schwermetallkonzentrat und mineralischer Rückstand	Mineralischer Rückstand für den Fall der Entsorgung ca. 1 Mg/Mg KS_{TS} [4]
Phos4Green®	P-haltige Asche fertig granuliert	98%	keine	keine
K3-sludge®	Calciumphosphat	keine Angabe	keine	P-arme Klärschlammasche
EuPhoRe®	P in Klärschlammasche aufgeschlossen	98%	keine	Filterasche 0,03 Mg/Mg KSA [4]
P-bac®	FePO_4	> 80 %	keine	Restasche angereichert mit Gips, Schwermetallkonzentrat
AshDec®	P als $\text{CaNaPO}_4 \cdot \text{Ca}_2\text{SiO}_4$ in Klärschlammasche	98%	keine	Rückstände aus der Rauchgasreinigung
AirPrex®	Struvit	20%	keine	P-abgereicherter Klärschlamm
CalPrex® PhosForce® Struvex®	Struvit oder Brushit	bis 50 %	keine	P-abgereicherter Klärschlamm
PYREG®	P-reiches Karbonisat (Kohle)	90%	keine	Rückstände aus der Rauchgasreinigung und Schlacke
P-RoC®	P-beladenes CSH teilw. Struvit	15%	keine	P-abgereicherter Klärschlamm

Tab. 6: Übersicht über den Energie- und Platzbedarf sowie über die Kosten der beschriebenen Verfahren.

Verfahren	Energiebedarf pro Mg KSA _{TS}	Platzbedarf	Kosten	DüMV konform	TRL [16]
Ash2 [®] Phos	25 kWh Wärme 30 kWh elektr. [4]	keine Angabe	keine Angabe	ja	8
Phos4Life	313 kWh Wärme 168 kWh elektr. [4]	5.600m ² /30.000 Mg KSA [12]	467 CHF/Mg KSA [7]	ja	4
Terra Nova [®] Ultra	315 kWh/Mg KS _{FM} [9]	150 m ² /1.000 Mg KS _{TS} [14]	2 Mio. €/1.000 Mg KS _{TS} [14]	nein	7
TetraPhos [®]	384 kWh Wärme 92 kWh elektr. [4]	0,01-0,08 m ² /Mg KSA	keine Angabe	ja	8(9)
Phos4Green [®]	643 kWh Wärme 214 kWh elektr.	ca. 5.000m ² /60.000 Mg KSA-Dünger [13]	Produktion: 104 €/Mg Produkt Rohstoffe: 140 €/Mg Produkt [15]	ja (abhängig von der Aschezusammensetzung)	7(8)
K3-sludge [®]	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	Vorprodukt für Düngemittelindustrie	4
EuPhoRe [®]	57 kWh elektr. [4]	700 m ² /10.000 Mg KS _{TS} [12]	200 CHF/Mg KSA [12]	ja (abhängig von der Aschezusammensetzung)	8
P-bac [®]	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	ja	4
AshDec [®]	0,31-0,58 kWh Gas 0,08-0,1 kWh pro kg Asche [5]	500-1.000 m ² /15.000 Mg Asche [5]	13-16 Mio. €/20.000 Mg Asche [5]	ja (abhängig von der Aschezusammensetzung)	6
AirPrex [®]	1,1 kWh/m ³ Faulschlamm [6]	150 m ² /100.000 EW [5]	630.000 €/100.000 EW [5]	ja	9
CalPrex [®] PhosForce [®] Struvex [®]	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe	ja	4
PYREG [®]	keine Angabe	ca. 100 m ² /3.250 Mg KS _{TS} [11]	1,5 Mio. €/30.000 EW [10]	nein	9
P-RoC [®]	1,17 kWh/m ³ Schlammwasser [6]	keine Angabe	89.790 €/67.000 EGW*a [8]	ja	5

6 Klärschlammkooperationen – ein wichtiges Element für eine effiziente Verwertung

Sofern die P-Rückgewinnung nicht auf der Kläranlage selbst, im Klärschlamm, ansetzen soll, ist der Zusammenschluss mit weiteren Kläranlagenbetreibern von Vorteil, um eine möglichst wirtschaftliche Umsetzung zu gewährleisten.

Dabei kommt der Vorbehandlung des Klärschlammes (Entwässerung und Trocknung) eine bedeutende Rolle zu. Idealerweise werden hier schon die kleineren Kläranlagen in ihren Kapazitäten berücksichtigt.

Dieser Schritt erfordert im allgemeinen noch nicht die Festlegung auf ein späteres Verfahren zur Phosphorrückgewinnung.

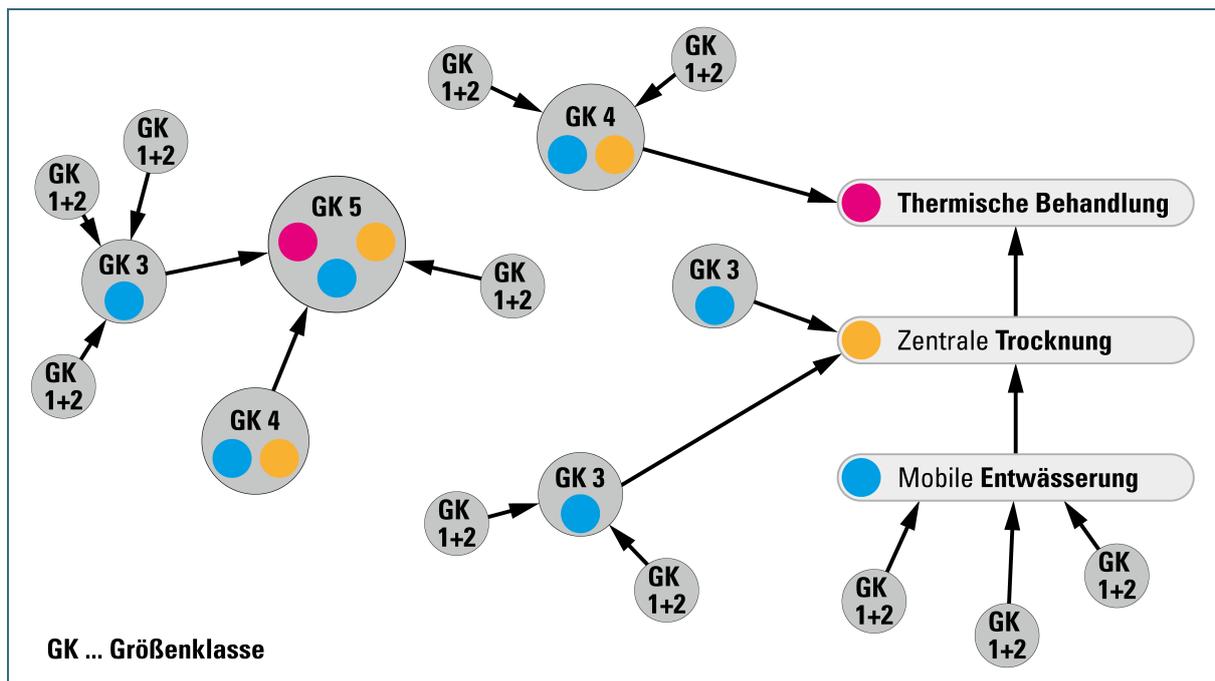


Abb. 8: Mögliche Zentralisierung von Entwässerungs-, Trocknungs- und Verbrennungsanlagen mit fortschreitender Vorbehandlung des Klärschlammes bei Kläranlagen unterschiedlicher Größenklassen.

Im Allgemeinen lassen sich zentrale, große Anlagen zur Klärschlammbehandlung, wirtschaftlicher bzw. überhaupt erst wirtschaftlich betreiben, wenn sie eine Mindestgröße erreichen. Dieser Zentralisierung ist der Mehraufwand an Transportkosten und den damit verbundenen Immissionen gegenüberzustellen.

Ideal erscheint ein Konzept, bei dem der Grad der Zentralisierung mit fortschreitender Vorbehandlung zunimmt. Dabei geben die kleinsten Kläranlagen ihren Nassschlamm an größere Kläranlagen ab. Diese besitzen dann entsprechend ausgelegte Anlagen zur Entwässerung. Der entwässerte Klärschlamm wird dann vor Ort getrocknet oder zur nächst größeren Kläranlage mit einer Klärschlamm-trocknung bzw. einer solitär betriebenen Trocknungsanlage gebracht. Der getrocknete Klärschlamm ist in seinem Volumen erheblich reduziert, so dass er mit minimalem Transportaufwand zu einzelnen Standorten der thermischen Verwertung gebracht werden kann.

Weiterführende Informationen zum Thema Klärschlammvorbehandlung und interkommunale Zusammenarbeit finden sich in der LfU-Publikation Klärschlamm Entsorgung – Planungshilfe für Kommunen“.

7 Weiterführende Informationen

7.1 Förderung interkommunaler Zusammenarbeit (RIZ) in Bayern (StMI)

Was wird gefördert?

- Neue Projekte in interkommunaler Zusammenarbeit

Wer kann die Zuwendungen erhalten?

- Alle bayerischen kommunalen Gebietskörperschaften und deren Zusammenschlüsse in der Rechtsform einer juristischen Person des öffentlichen Rechts, sowie die von ihnen geführten Unternehmen und Einrichtungen

Wie hoch ist die Förderhöhe?

- Bis zu 50.000 Euro, max. 85 % der zuwendungsfähigen Ausgaben bis zu 90.000 Euro in Teilräumen mit besonderem Handlungsbedarf entsprechend dem Landesentwicklungsplans

Was sind die Voraussetzungen für die Förderung?

- Dauerhafte Einrichtung, mind. jedoch auf 5 Jahre Einsparung der personellen und sächlichen Ausgaben von mind. 15 %

7.2 Kommunalrichtlinie (bundesweit, BMU)

Was wird gefördert?

- kommunale Netzwerke (Gewinnungsphase),
- Potenzialstudien (Abwasserbehandlungsanlagen, Abwärmenutzung)
- Investive Projekte (Klärschlammverwertung im Verbund, Erneuerung Belüftung, Abwärmenutzung, Neubau Vorklärung/Faulung, Verfahrenstechnik) im Rahmen eines Verbundkonzeptes von kleineren Kläranlagen.

Wer kann die Zuwendungen erhalten?

- Verband/Vereinigung, Öffentliche Einrichtung, Kommune, Hochschule, Bildungseinrichtung, Unternehmen

Wie hoch ist die Förderhöhe?

- Die maximale Höhe des Investitionszuschusses beträgt 200.000 Euro.
- Laufzeit 2022 bis 2027, Antragsfristen jeweils 1. Jan. - 31. Dez.
- Bewilligungszeitraum in der Regel 48 Monate
- Förderquote 40 % (+10 %)
- Mindestzuwendung 10.000 Euro

Was sind die Voraussetzungen für die Förderung?

- Fördervoraussetzungen Alle teilnehmenden Kläranlagen dürfen höchstens 50 km Luftlinie von einer zentralen Anlage entfernt sein.
- Vorgegangene Machbarkeitsstudie (ebenfalls förderfähig mit Festbetrag von 5.000 Euro)

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Anforderungen an die Klärschlammerzeuger kommunaler Kläranlagen im Hinblick auf die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung ab dem 01.01.2032.	6
Abb. 2:	Prozentualer Anteil von Kläranlagen in Abhängigkeit der Ausbaugröße von kommunalen Kläranlagen in Bayern [1]	7
Abb. 3:	Prozentualer Anteil des Klärschlammaufkommens in Abhängigkeit der Ausbaugröße von Kläranlagen in Bayern [1].	8
Abb. 4:	Das kommunale Klärschlammaufkommen in den einzelnen Landkreisen und kreisfreien Städten in Abhängigkeit der Ausbaugröße der Kläranlagen.	9
Abb. 5:	Anteile der Verwertungsform des in Bayern anfallenden kommunalen Klärschlamm [1].	10
Abb. 6:	Formen der thermischen Verwertung des 2020 in Bayern angefallenen kommunalen Klärschlamm [1].	11
Abb. 7:	Übersicht über eine Vielzahl von Verfahren zur Phosphorrückgewinnung.	12
Abb. 8:	Mögliche Zentralisierung von Entwässerungs-, Trocknungs- und Verbrennungsanlagen mit fortschreitender Vorbehandlung des Klärschlamm bei Kläranlagen unterschiedlicher Größenklassen.	21

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht über Anzahl der Kläranlagen in der jeweiligen Ausbaugröße und ihre Anteile am Klärschlammaufkommen [1]	7
Tab. 2:	Verwertung des in Bayern anfallenden kommunalen Klärschlamm [1]	10
Tab. 3:	In Betrieb befindliche und geplante Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Bayern.	10
Tab. 4:	Übersicht über den Verfahrenstyp, die wichtigsten Prozessschritte und die dafür vorgesehenen Betriebsmittel.	18
Tab. 5:	Übersicht über die Rückgewinnungsprodukte, die Rückgewinnungsrate und Reststoffe der beschriebenen Verfahren.	19
Tab. 6:	Übersicht über den Energie- und Platzbedarf sowie über die Kosten der beschriebenen Verfahren.	20

Literaturverzeichnis

- [1] Datengrundlage: DABay-Abfrage für den Berichtszeitraum 2020 der Rubrik „Kläranlage Stammdaten“ sowie der Jahresberichte der Kläranlagen des Jahres 2020.
- [2] Die gesamte Kapazität der Anlage beträgt 24.000 Mg KS_{TS}/a . Davon entfielen 2020 jedoch lediglich 10.900 Mg KS_{TS}/a auf Klärschlamm aus Bayern.
- [3] Bundesamt für Umwelt (Hrsg.) (2017): Beurteilung von Technologien zur Phosphorrückgewinnung. (www.ebp.ch/sites/default/files/project/uploads/EBP-Bericht_P-Technologien.pdf)

- [4] Bundesamt für Umwelt (Hrsg.) (2019): Technologien zur Phosphorrückgewinnung. (www.bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/abfall/externe-studien-berichte/technologien-zur-phosphor-rueckgewinnung.pdf.download.pdf/Schlussbericht_P-Technologien.pdf)
- [5] Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.) (2014): Endbericht Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser. (https://iwr.tuwien.ac.at/fileadmin/mediapool-wasserguete/Projekte/Phosphor/Phosphorrueckgewinnung_aus_dem_Abwasser_Endbericht_6.3.14.pdf)
- [6] RWTH Aachen, Inst. f. Siedlungswasserwirtschaft (Hrsg.) (2018): Entwicklung und Integration innovativer Kläranlagentechnologien für den Transformationsprozess in Richtung Technikwende. Abschlussbericht. (https://bmbf.nawam-erwas.de/sites/default/files/abschlussbericht_e-klaer_geschuetzt.pdf)
- [7] Phosphor-Mining aus Klärschlammasche, Abschlussbericht zu Händen der Baudirektion des Kantons Zürich. (www.zh.ch/content/dam/zhweb/bilder-dokumente/themen/umwelt-tiere/abfall-rohstoffe/abfallwirtschaft/publikationen/phosphor-mining/abschlussbericht_pilotierung_phos4life_2019.pdf)
- [8] Karlsruher Institut für Technologie (Hrsg.) (2013): Phosphor-Elimination aus kommunalem Abwasser auf Basis des P-RoC-Verfahrens zur Reduzierung des P-Gehaltes in Klärschlamm, Schlussbericht.
- [9] Blöhse, D. (2018): Hydrothermale Karbonisierung – HTC-Verfahren. Aus Energie aus Abfall, Band 15, S. 649 ff. Visiv-Verlag. (www.vivis.de/wp-content/uploads/EaA15/2018_EaA_649-668_Bloehse)
- [10] Siekmann, K. und Jakob, J. (2013): Weitergehende thermische Klärschlammbehandlung auf Kläranlagen kleiner und mittlerer Größe. Vortrag. (<https://docplayer.org/59298571-Weitergehende-thermische-klarschlammbehandlung.html>)
- [11] PYREG Prospekt für die Anlage P1500
- [12] Kanton Zürich, Baudirektion Amt für Abfall, Wasser, Energie und Luft (AWEL) (Hrsg.) (2018): Verfahrenstechnische Marktanalyse für die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserpfad. (http://vbsa.ch/wp-content/uploads/2018/07/18-07-05_VTMA_Schlussbericht_rev1.pdf)
- [13] EU-Recycling +Umwelttechnik (1/2021): Phosphorrückgewinnung aus kommunalen Abwässern: Vieles geplant – Die Branche stellt sich auf den Wechsel ein. (https://eu-recycling.com/pdf/EU-Recycling_01-2021)
- [14] Green Infrastructure Maßnahmen aus Klärschlamm-Kaskadennutzung (greenIKK) mittels grenzüberschreitender interregionaler Zusammenarbeit - Abschlussbericht. (https://opus4.kobv.de/opus4-haw-landshut/frontdoor/deliver/index/docId/224/file/01_Abschlussbericht.pdf)
- [15] Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) (2018): Effizientes und wirtschaftliches Verfahren zur Überführung von Klärschlammaschen in Hochleistungsdünger - Abschlussbericht über ein FuE-Projekt unter dem Aktenzeichen AZ: 33767/01. (www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-33767.pdf)
- [16] Dem TRL (technology readiness level) oder Technologie Reifegrad liegt eine Skala von 1-9 zur Charakterisierung des Entwicklungsstandes einer Technologie zugrunde. Siehe auch: NKS-KMU - Technology Readiness Level (TRL) (www.nks-eic-accelerator.de/teilnahme-trl.php)



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

