



Klärschlamm Entsorgung in Bayern

Planungshilfe für Kommunen



abfall



Klärschlamm Entsorgung in Bayern

Planungshilfe für Kommunen

Impressum

Klärschlamm Entsorgung in Bayern – Planungshilfe für Kommunen

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:

Die Bearbeitung erfolgte durch das Bayerische Landesamt für Umwelt, die bifa Umweltinstitut GmbH und den Bayerischen Gemeindetag auf der Grundlage des UmweltSpezials „Klärschlamm Entsorgung in Bayern – Planungshilfe für Kommunen“ vom Mai 2011, April 2019 und September 2025, Augsburg.

bifa Umweltinstitut GmbH, Dr. Dieter Tronecker, Andreas Happach

Bayerischer Gemeindetag, Dr. Juliane Thimet, Dr. Andreas Gaß

LfU: Referat 34; Referat 35, Dr. Wolfgang Waldmüller

Redaktion:

LfU, Referat 35

Bildnachweis:

Alles LfU außer:

Dr. Christian Schaum, Universität der Bundeswehr München – Institut für Wasserwesen, Mitteilungen Nr. 130, verändert mit Zustimmung des Urhebers, Seite 35

Biogas Alerheim OHG, Fessenheimer Str. 9, 86733 Alerheim, Titel und Seiten 22 und 23

Stand:

September 2025, 3. überarbeitete Fassung

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 Wahlwerbern 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	Einleitung und Zielsetzung	7
2	Klärschlammentsorgung in Bayern	8
2.1	Kläranlagengrößen und -anzahl sowie anfallende Klärschlammmengen	8
2.2	Stand der Klärschlammentsorgung in Bayern	8
3	Boden- und Gewässerschutz	12
3.1	Klärschlamm als Schadstoffsенке	12
3.2	Schadstoffpalette des Klärschlammes	12
3.3	Keime im Klärschlamm	13
3.4	Vorsorgender Boden- und Gewässerschutz bei der Klärschlammentsorgung	13
4	Grundlagen für die Erstellung eines Klärschlammkonzeptes	14
4.1	Strategische Überlegungen	14
4.2	Rahmenbedingungen durch die Klärschlammverordnung	16
4.3	Datenerhebung und Konzepterstellung	17
5	Entwässerung und Trocknung	19
5.1	Entwässerung	19
5.2	Trocknung	19
5.2.1	Allgemeines	19
5.2.2	Verfahrensprinzipien	20
5.2.3	Trocknerarten	20
5.2.3.1	Konvektionstrockner	21
5.2.3.2	Kontaktstrockner	21
5.2.3.3	Strahlungstrockner	22
5.2.4	Wärmerückgewinnung sowie Brüden- und Abgasbehandlung	24
5.2.5	Energiebedarf für die Klärschlamm-trocknung	25
5.2.6	Vergleich der verschiedenen Verfahrensprinzipien	25
6	Thermische Entsorgungswege für Klärschlamm	27
6.1	Mitverbrennung	27
6.1.1	Kohlekraftwerk	27
6.1.2	Zementwerk	27
6.1.3	Müllheizkraftwerk	28

6.2	Monoverbrennung	29
6.2.1	Wirbelschichtverbrennungsanlagen	29
6.2.2	Rostfeuerungsanlage der Fa. Emter GmbH	31
6.2.3	Sonderformen der thermischen Klärschlammverwertung	31
7	Phosphorrückgewinnung	33
7.1	Allgemeines zur Ressource Phosphor	33
7.2	Potenziale zur Phosphorrückgewinnung	33
7.3	Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor	34
7.4	Rückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung	36
7.4.1	Struvit-Verfahren	37
7.4.2	CSH-Verfahren	37
7.4.3	Hydrothermale Carbonisierung mit gekoppelter Phosphorrückgewinnung	38
7.5	Rückgewinnung innerhalb des Abfallrechts	38
7.5.1	Physikalisch-chemischer Teilaufschluss	39
7.5.2	Thermochemische Aschekonditionierung	40
7.5.3	Nasschemischer Ascheaufschluss und Aufbereitung	41
7.6	Perspektiven der Phosphorrückgewinnung	42
7.7	Verwertbarkeit der Rezyklate	43
7.8	Bodenschutz	44
7.9	Ressourcenschutz	45
8	Kosten der Klärschlammentsorgung	46
8.1	Speicherung	46
8.2	Transporte	46
8.2.1	Transporte von Nassschlamm	46
8.2.2	Transporte von entw. Schlamm	46
8.2.3	Transporte von getrocknetem Schlamm	47
8.3	Entwässerung	47
8.4	Trocknung	47
8.4.1	Solare Trocknung	47
8.4.2	Thermische Trocknung	47
8.5	Thermische Behandlungsverfahren	48

8.5.1	Monoverbrennung	48
8.5.2	Mitverbrennung im Kohlekraftwerk/Biomassekraftwerk	48
8.5.3	Mitverbrennung im Müllheizkraftwerk	48
8.5.4	Zementwerk	48
8.5.5	Vergasungs- und Pyrolyseverfahren	48
8.5.6	Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung	48
8.6	Landbauliche Klärschlammverwertung (Rekultivierung)	48
8.7	Entsorgungskosten ab 2029	49
9	Möglichkeiten interkommunaler Zusammenarbeit	52
9.1	Grundsätzliche Überlegungen zur Zuständigkeit der Gemeinden	52
9.2	Aufgabenwahrnehmung in interkommunaler Zusammenarbeit	53
9.3	Vermischungsverbot	54
9.4	Rechtsrahmen	54
9.5	Organisationsformen	55
9.5.1	Zweckvereinbarung, öffentlich-rechtlicher Vertrag	55
9.5.2	Zweckverband	56
9.5.3	Gemeinsames Kommunalunternehmen	57
9.5.4	Privatrechtsformen	58
9.5.4.1	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH)	58
9.5.4.2	GmbH & Co. KG	59
9.6	Möglichkeiten der Förderung	60
9.6.1	Förderung der interkommunalen Zusammenarbeit	60
9.6.2	Energieförderung	61
9.6.3	Umweltinnovationsprogramm	61
9.6.4	Infrakredit Kommunal	62
9.6.5	Förderung nach „RIZ“	62
9.6.6	Kommunalrichtlinie	62
	Anhang: Erhebungsbogen	64
	Abbildungsverzeichnis	65
	Tabellenverzeichnis	65
	Literaturverzeichnis	66

Zusammenfassung

Klärschlamm ist die Schadstoffsенке des Abwasserreinigungsprozesses in einer Kläranlage. Die aus dem Abwasser entfernten umweltschädlichen Stoffe reichern sich prozessbedingt im Klärschlamm an. Er enthält neben Schwermetallen auch – zum Teil schwer abbaubare – organische Schadstoffe. Die Risiken einer Aufbringung von Klärschlämmen auf Böden werden von Fachleuten als langfristig nicht kalkulierbar eingeschätzt. Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) vom 27.09.2017 hat dies mit Erweiterungen des Geltungsbereichs bei der bodenbezogenen Nutzung des Klärschlammes berücksichtigt (AbfKlärV 2017). Neben der landwirtschaftlichen Verwertung sind nun auch der Landschaftsbau und die Rekultivierung betroffen. Auch Klärschlammkompost und -gemisch fallen nun unter die AbfKlärV. Der Bereich der zu untersuchenden Schadstoffe wurde erweitert, viele Grenzwerte abgesenkt (Kapitel 3).

Die Bayerische Staatsregierung hat vor 20 Jahren aus Gründen eines vorsorgenden Verbraucher-, Boden- und Gewässerschutzes entschieden, auf ein Ende der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm hinzuwirken. Das umfasst landwirtschaftliche, gärtnerische und landschaftsbauliche Verwertungszwecke. Dies spiegelt sich auch im bayerischen Abfallwirtschaftsplan wider, gemäß dem der „vom Landtag beschlossene Ausstieg aus der landwirtschaftlichen, landschaftsbaulichen und gärtnerischen Verwertung von Klärschlämmen [...] weiter vorangebracht und der ökologische Stand bei der Entsorgung von Klärschlämmen weiter gesteigert werden“ soll (AbfPV 2014). Sowohl in Bayern als auch in Deutschland ist in den letzten Jahren eine Zunahme der thermischen Behandlung und ein Rückgang der landwirtschaftlichen Verwertung festzustellen (Kapitel 2).

Die Planungshilfe richtet sich an Entscheidungsträger der Kommunen sowie Ingenieurbüros, die mit der Aufgabe betraut sind, ein gebietsübergreifendes Klärschlammentsorgungskonzept zu erstellen. Insbesondere soll die Planungshilfe den vielen kleinen Kläranlagen im ländlich geprägten Raum eine Perspektive aufzeigen, wie ein Ausstieg aus der landwirtschaftlichen Verwertung gestaltet werden kann (Kapitel 4).

In einem kurzen Überblick werden die wichtigsten Techniken der Entwässerung, Trocknung und thermischen Behandlung dargestellt (Kapitel 5 und 6).

Das Kapitel Phosphorrückgewinnung geht auf die Motivation und die möglichen Wege zur Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammaschen ein. Die Verfahren setzen entweder im Bereich der Kläranlage oder im Bereich des Abfallrechts an. Grundsätzlich ist die Phosphorrückgewinnung umso einfacher, je höher die Konzentration im Medium ist. Hinsichtlich dieses Aspektes sind Verfahren in Verbindung mit einer Klärschlammmonoverbrennung anderen Ansätzen überlegen (Kapitel 7).

Orientierungswerte für die Kosten der einzelnen Behandlungsschritte sind im Kapitel 8 zusammengestellt. Die Behandlungskosten bewegen sich insgesamt in einer Größenordnung von 400 €/t Trockenmasse. Die Transportkosten fallen noch zusätzlich an.

Schließlich betrachtet die Planungshilfe die Möglichkeiten der interkommunalen Zusammenarbeit bei der Entsorgung von Klärschlamm. Für die Gründung eines gebietsübergreifenden Entsorgungsunternehmens müssen sich die betroffenen Kommunen auf eine geeignete Gesellschaftsform einigen (Kapitel 9).

1 Einleitung und Zielsetzung

Die Bayerische Staatsregierung hat sich zum Ziel gesetzt, die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm aus Gründen des vorsorgenden Verbraucher-, Boden- und Gewässerschutzes zu beenden. Klärschlamm soll Entsorgungsverfahren zugeführt werden, die zu einer Zerstörung der organischen Schadstoffe und Keime führen. Dies wird durch eine thermische Behandlung des Klärschlammes gewährleistet.

Dieses Ziel wurde 2006 in den Abfallwirtschaftsplan Bayern und das Landesentwicklungsprogramm Bayern aufgenommen und 2014 fortgeschrieben (AbfPV 2014). Kläranlagenbetreibern und -entsorgern wird empfohlen, auf die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm zu verzichten. Auch Nahrungsmittelhersteller (Mühlen), Kirchen und Verbraucherverbände unterstützen die Ziele.

Zielsetzung dieser Planungshilfe zur Klärschlammentsorgung in Bayern ist es, den Entscheidungsträgern ein Werkzeug an die Hand zu geben, mit dem sie unter Berücksichtigung der Klärschlammverordnung die verschiedenen thermischen Entsorgungswege beurteilen und auswählen können. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf eine interkommunale Zusammenarbeit gelegt, um auch der Vielzahl der kleinen Kläranlagen in Bayern eine realistische Perspektive zum Ausstieg aus der bodenbezogenen Verwertung aufzuzeigen. Zudem werden ebenso die Rahmenbedingungen der Phosphorrückgewinnung aufgezeigt.

Die vorliegende Planungshilfe hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz initiiert. Die erste Ausarbeitung 2010 erfolgte durch das Bayerische Landesamt für Umwelt auf der Grundlage einer regionalen Untersuchung zur Klärschlammentsorgung sowie eines Entwurfskonzepts für die Handlungshilfe, erstellt von der U.T.E. Ingenieur GmbH, Regensburg.

Die erste Überarbeitung 2018 erfolgte durch das Bayerische Landesamt für Umwelt, für die Kapitel „Phosphorrückgewinnung“, „Kosten der Klärschlammentsorgung“ und aktuellen Trends durch die bifa umweltinstitut GmbH. Das Kapitel „Möglichkeiten interkommunaler Zusammenarbeit“ wurde unter maßgeblicher Beteiligung des bayerischen Gemeindetags erstellt.

Die zweite Überarbeitung im Jahr 2025 umfasste hauptsächlich die Überarbeitung der Kapitel zur Entwässerung und Trocknung, zur thermischen Entsorgung sowie der Phosphorrückgewinnung durch das Bayerische Landesamt für Umwelt.

2 Klärschlamm Entsorgung in Bayern

2.1 Kläranlagen Größen und -anzahl sowie anfallende Klärschlamm Mengen

Bayerns Kläranlagenstruktur ist geprägt durch viele kleine ländliche Kläranlagen. Nahezu 50 % der derzeit 2.241 kommunalen Kläranlagen (2024) weisen eine Ausbaugröße unter 1.000 Einwohnerwerte (EW¹) auf. An der Gesamtausbaugröße der bayerischen Kläranlagen von 26,7 Mio. EW beträgt ihr Anteil jedoch weniger als 2 % (s. Tabelle 1).

Tab. 1: Anzahl und Ausbaugrößen der bayerischen kommunalen Kläranlagen (Stand Juni 2025)

Ausbaugröße in EW	Größenklasse nach Abwasserverordnung	Anzahl kommunale Kläranlagen	Gesamtausbaugröße in EW
< 1.000	1	872	0,3 Mio.
1.000 bis 5.000	2	694	1,9 Mio.
5.001 bis 10.000	3	229	1,7 Mio.
10.001 bis 50.000	4a ²	299	7,0 Mio.
50.001 bis 100.000	4b	45	3,4 Mio.
> 100.000	5	36	12,6 Mio.
Gesamt Bayern		2.175	27,0 Mio.

Jährlich fallen auf den bayerischen kommunalen Kläranlagen etwa 251.000 Megagramm Trockenmasse³ (t TM) Klärschlamm an. Unter der Annahme eines durchschnittlichen Trockenrückstandgehaltes⁴ (TR-Gehalt) von ca. 3 % des in den Kläranlagen anfallenden Schlammes entspricht dies einer anfallenden Nassschlammmenge von ca. 8,4 Mio. Tonnen pro Jahr.

2.2 Stand der Klärschlamm Entsorgung in Bayern

Die Entwicklung der Entsorgung des bayerischen Klärschlammes zeigt die nachfolgende Abbildung 1. Die bodenbezogene Verwertung in der Landwirtschaft sowie dem Landschaftsbau und der Rekultivierung ist stark rückläufig. Die thermische Behandlung (Verbrennung) hat im gleichen Zeitraum stark zugenommen.

Im Jahr 2023 war für Bayern die thermische Behandlung (Verbrennung) mit 88 % der entsorgten Klärschlammmenge der wichtigste Entsorgungsweg. Der Anteil des landwirtschaftlich verwerteten Klärschlammes betrug 7 %. Einer stofflichen Verwertung bei Rekultivierungsmaßnahmen oder im Landschaftsbau wurden lediglich 5 % zugeführt. Etwa 29 % des bayerischen Klärschlammes wurde

1 Der Einwohnerwert (EW) ist die Summe aus den tatsächlichen Einwohnern (Einwohnerzahl EZ), die an eine Kläranlage angeschlossen sind, und den Einwohnergleichwerten (EGW). Der Einwohnergleichwert ist ein Maß für die Schmutzfracht, die mit gewerblichem Abwasser in eine Kläranlage gelangt.

2 Die Unterteilung in die Größenklassen 4a und 4b entspricht nicht der Einteilung in der Abwasserverordnung (AbwV). Sie wird jedoch in Bezug auf die in der AbfKlärV enthaltenen Vorgaben verwendet, um die Anlagen von 10.001 bis 50.000 EW von denen mit 50.001 bis 100.000 EW zu trennen.

3 Die Trockenmasse eines Schlammes (TM in kg oder t) ist die Masse an Feststoffen, die nach dem Trocknungsverfahren gemäß DIN 38414, Teil 2, ermittelt wird.

4 Der Trockenrückstandsgehalt (TR-Gehalt in %) eines Schlammes ist der Massenanteil an Feststoffen im Schlamm. Er wird nach der in DIN 38414, Teil 2, aufgeführten Methode bestimmt.

außerhalb Bayerns entsorgt und dort vor allem thermisch oder bei Rekultivierungsmaßnahmen verwertet. Die Deponierung von Klärschlamm ist nicht mehr zulässig.

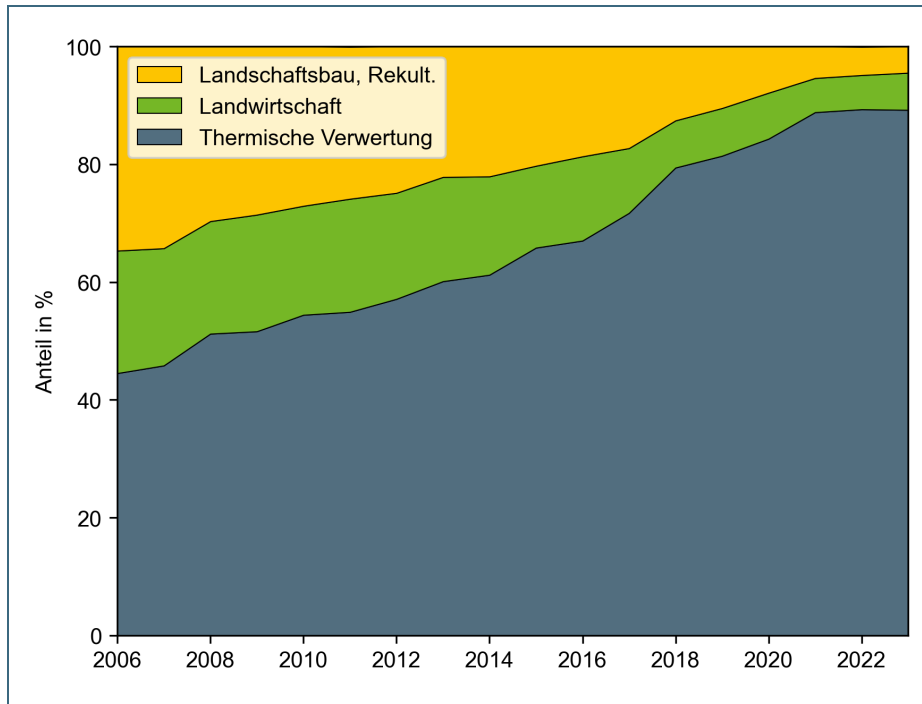


Abb. 1:
Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung in Bayern

Die Abbildung 2 zeigt die prozentualen Anteile der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung in den einzelnen Landkreisen und kreisfreien Städten Bayerns. In 84 der insgesamt 96 Gebietskörperschaften wird maximal 20 % landwirtschaftlich verwertet. Nur drei Gebietskörperschaften verwerten 40 Prozent oder mehr ihrer Klärschlamm mengen auf diesem Weg.

Der Anteil des Klärschlamm s aus den einzelnen Gebietskörperschaften, der thermisch behandelt wird, ist in der Abbildung 3 dargestellt. Insbesondere der Klärschlamm aus den großen bayerischen Städten und den Ballungszentren wird weitgehend einer thermischen Behandlung zugeführt.

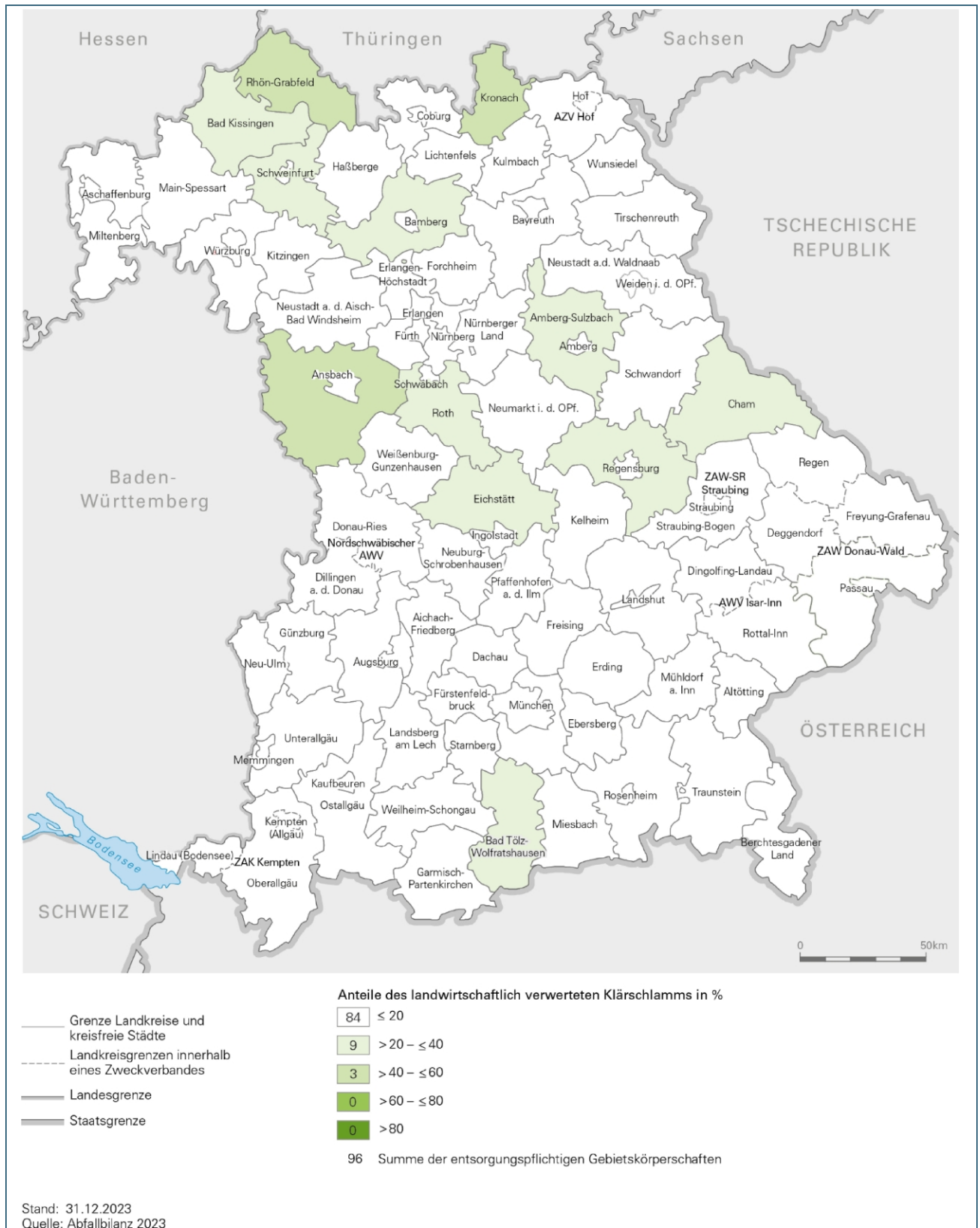


Abb. 2: Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Bayern

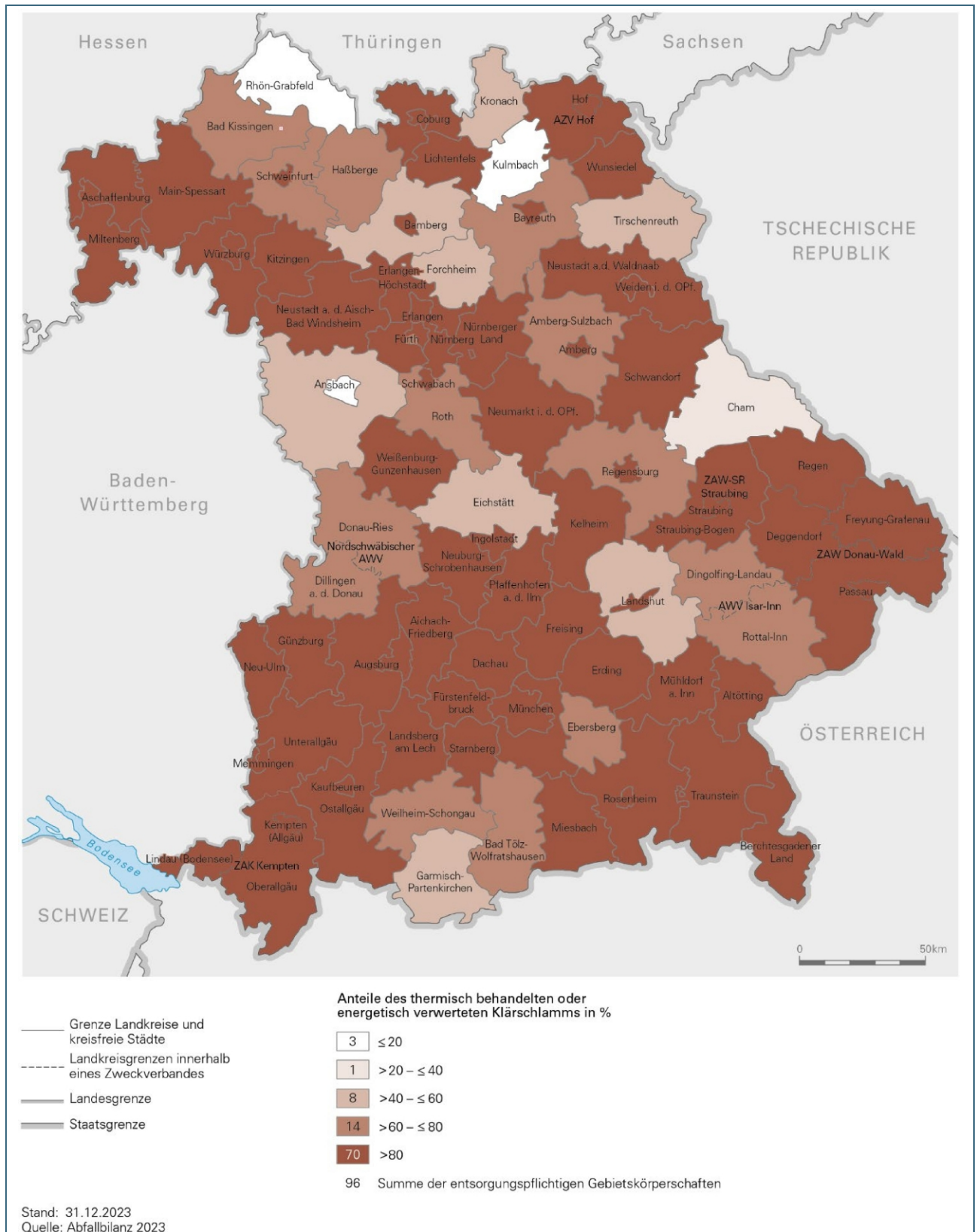


Abb. 3: Thermische Klärschlammbehandlung in Bayern

3 Boden- und Gewässerschutz

3.1 Klärschlamm als Schadstoffsенke

Klärschlamm stellt im Abwasserreinigungsprozess eine Schadstoffsенke für eine nicht überschaubare Vielfalt an Abwasserinhaltsstoffen aus Haushalten, Gewerbe und Industrie dar. Durch die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm werden die aus dem Abwasser abgetrennten Schadstoffe wieder großflächig auf Böden ausgebracht und können unter Umständen auch in Gewässer und das Grundwasser gelangen. Die Wirkungen dieser Schadstoffe auf die Umwelt und Gesundheit sind teilweise noch unbekannt. Dies trifft insbesondere auf viele organische Schadstoffe zu (beispielsweise Arzneimittelmittelrückstände, Flammschutzmittel, Mikroplastik). Auch über die Kombinationswirkung der verschiedenen Stoffe und Abbauprodukte auf die Umwelt gibt es kaum Erkenntnisse. Daher hat sich – wie in Kapitel 1 erwähnt – die Bayerische Staatsregierung zum Ziel gesetzt, die landwirtschaftliche, gärtnerische und landschaftsbauliche Verwertung des Klärschlammes zu beenden (AbfPV 2014).

3.2 Schadstoffpalette des Klärschlammes

Bei der landwirtschaftlichen und landschaftsbaulichen Verwertung von Klärschlamm sind neben der Klärschlammverordnung (AbfKlärV 2017) insbesondere die Vorgaben des Düngerechts und der Bodenschutzgesetzgebung zu beachten. Die AbfKlärV enthält unter anderem Untersuchungs- und Nachweispflichten. Die zu untersuchenden Parameter sind auf neun Schwermetalle sowie adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX), polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/PCDF), Benzo(a)pyren und ausgewählte per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) beschränkt. Großteils bezieht sich die AbfKlärV bei den Grenzwerten auf die Düngemittelverordnung (DüMV) (DüMV 2019). Das Gefährdungspotenzial des Klärschlammes wird daher nur unzureichend erfasst. Bei umfangreichen Untersuchungen wurden bayerische Klärschlämme auf eine Vielzahl an weiteren organischen Schadstoffen (wie Weichmacher, Flammschutzmittel, Desinfektionsmittel) untersucht (Hübner et al. 2011). Diese Stoffe sind großteils langlebig (persistent), besitzen meist eine hohe Bioakkumulation und teilweise eine hohe Ökotoxizität. In nahezu allen untersuchten Klärschlämmen konnten diese zusätzlichen Parameter in unterschiedlichen Konzentrationen nachgewiesen werden.

PFAS sind eine Stoffgruppe, die Anfang 2000 als relevante Inhaltsstoffe des Klärschlammes bekannt wurden. PFAS besitzen schmutz-, farb-, fett-, öl- und gleichzeitig wasserabweisende Eigenschaften und werden deshalb in vielen Bereichen eingesetzt. Sie weisen eine hohe Beständigkeit gegenüber UV-Strahlung und Verwitterung auf und sind biologisch praktisch nicht abbaubar. Die bekanntesten Vertreter sind die Perfluorooctansäure (PFOA) und die Perfluorooctansulfonsäure (PFOS). Die Hauptanwendungsgebiete von PFAS liegen im Bereich der Oberflächenbehandlung von Metallen (Verchromung), der Foto- und Halbleiterindustrie, der Papierveredelung und der Spezialchemie. Auch in Hydraulikflüssigkeiten von Flugzeugen, in Funktionskleidung, in der Medizintechnik und in Feuerlöschmitteln werden und wurden sie eingesetzt.

Mit der AbfKlärV ist ein Grenzwert von 0,1 mg/kg TM für die Summe PFOA und PFOS festgelegt, ohne Messtoleranzen. Von 2006 bis 2013 wurde bei 6 % der Kläranlagen mindestens bei einer Messung eine Überschreitung des bayerischen Vorsorgewertes von 0,1 mg/kg TM für die Summe aus elf PFAS-Verbindungen im Klärschlamm festgestellt. Die Untersuchung erfasste rund 1.000 bayerischen Kläranlagen. Derartiger Klärschlamm ist einer thermischen Behandlung zuzuführen. Die thermische Behandlung erreicht, dass zumindest ein Großteil der PFAS zerstört wird (Vogel et al. 2024).

3.3 Keime im Klärschlamm

Im Abwasser und Klärschlamm können neben Schadstoffen Krankheitserreger menschlicher und tierischer Herkunft enthalten sein. Das Spektrum reicht von einer Vielzahl von Bakterien und Viren über parasitäre Erreger bis hin zu Hefen und Pilzen. Bei der derzeit üblichen Abwasser- und Schlammbehandlung werden die Krankheitserreger einerseits in gewissem Umfang dezimiert, andererseits in den Klärschlamm überführt und dort aufkonzentriert. Eine gezielte Abtötung der Keime (Hygienisierung) findet auf den Kläranlagen in der Regel nicht statt. Die Überlebensdauer von Mikroorganismen ist sehr unterschiedlich und reicht bei sporenbildenden Bakterien bis zu mehreren Jahren, im Extremfall Jahrzehnten. Durch Anwendungsverbote und -beschränkungen nach den Vorgaben der Klärschlammverordnung werden die Risiken der direkten Übertragung von Keimen auf landwirtschaftliche Nutztiere und den Menschen über Futter und Nahrung bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm zwar minimiert, das Problem der indirekten Übertragung durch belebte oder unbelebte Überträger (Vektoren) und des Eintrags in die Biozönose (Gemeinschaft der Organismen) ist jedoch nach Expertenmeinungen nicht gelöst.

Dies ist in der Klärschlammverordnung berücksichtigt. Die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch oder Klärschlammkompost ist nur zulässig, wenn diese Stoffe den Anforderungen an die Seuchen- und die Phytohygiene nach der DüMV entsprechen.

3.4 Vorsorgender Boden- und Gewässerschutz bei der Klärschlamm entsorgung

Die zurückliegenden Änderungen der Klärschlammverordnung und im Düngemittelrecht bewirkten einen Rückgang der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung. Da die Anforderungen auch für die Verwendung von Klärschlamm beim Landschaftsbau und bei Rekultivierungsmaßnahmen gelten, ist auch in diesen Bereichen mit einem Rückgang des Klärschlammeinsatzes zu rechnen.

Aus bayerischer Sicht sind jedoch die geplanten Anforderungen für den vorsorgenden Boden- und Gewässerschutz nicht ausreichend. So ist aus der Sicht des Bodenschutzes nicht gewährleistet, dass es langfristig zu keinen Schadstoffanreicherungen im Boden kommt (vgl. Vorsorgepflicht nach § 7 Bundes-Bodenschutzgesetz). Daher wird weiterhin an dem Ziel des Ausstiegs aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung festgehalten.

Bei einer thermischen Behandlung von Klärschlamm werden die organischen Schadstoffe einschließlich der Keime zerstört. Auch die Schwermetalle werden in der Regel weitgehend aus dem Schadstoffkreislauf entfernt, indem sie in den Aschen und Abgasreinigungsrückständen angereichert und anschließend mit ihnen entsorgt werden. Allerdings ist auf der Grundlage des geltenden Düngemittelrechts eine landwirtschaftliche Verwertung der Aschen möglich. Voraussetzung ist hierbei die Einhaltung der in der Düngemittelverordnung aufgeführten Schwermetallgrenzwerte. Bereits in den eingesetzten Klärschlämmen sind die Grenzwerte der deutschen Düngemittelverordnung einzuhalten.

Parallel zum deutschen Düngemittelrecht kann Klärschlamm asche auf Basis der EU-Düngeprodukteverordnung in Verkehr gebracht werden. Die dort gegebenen Schadstoffgrenzwerte unterscheiden sich geringfügig vom deutschen Düngemittelrecht. Das europäische Düngemittelrecht nennt keine Schadstoffgrenzwerte für den Klärschlamm vor der thermischen Behandlung.

4 Grundlagen für die Erstellung eines Klärschlammkonzeptes

4.1 Strategische Überlegungen

Klärschlammmentsorgungskonzepte können für einzelne Kläranlagen oder gemeinsam für mehrere Kläranlagen, auch landkreisübergreifend, erstellt werden. Bei der Erstellung müssen sich die Beteiligten auf einen nachhaltigen Behandlungs- und Entsorgungsweg einigen. Bei regionalen Konzepten ist dies in der Regel die thermische Behandlung. Dabei muss die Phosphorrückgewinnung berücksichtigt werden.

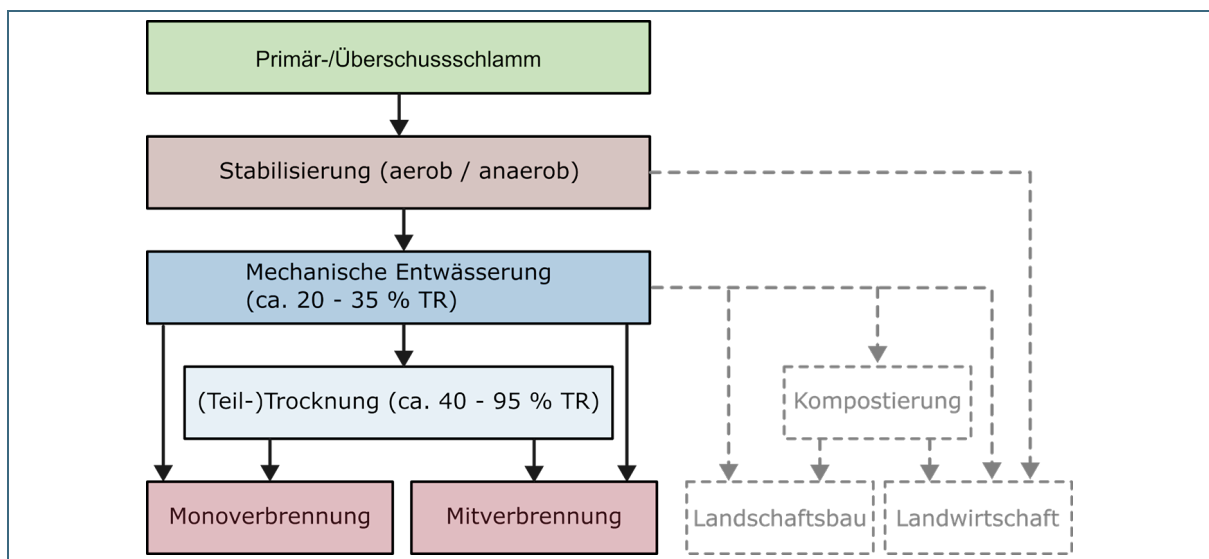


Abb. 4: Übersicht über die Behandlungs- und Entsorgungswege von Klärschlamm

Die thermische Klärschlammbehandlung erfordert in der Regel eine Vorbehandlung des Schlammes, um einen entsprechenden Heizwert und ein geringes Transportvolumen zu erreichen. In Abb. 4 sind mögliche Behandlungsschritte und Entsorgungswege dargestellt. Der Primär- und Überschussschlamm geht nach einer Schlammstabilisierung (Faulung oder aerobe Stabilisierung) in die maschinelle Schlammmentwässerung. Der entwässerte Schlamm kann anschließend teil- oder vollgetrocknet werden und über verschiedene Wege, wie Monoverbrennung, die Mitverbrennung in Kohle- oder Müllheizkraftwerken und Zementwerken oder andere thermische Verfahren behandelt werden. Daneben kann die bodenbezogene Verwertung – teilweise auch ohne Entwässerung – bei der Kompostierung, in der Landwirtschaft oder im Landschaftsbau erfolgen. Dieser Verwertungsweg ist gestrichelt dargestellt, da die thermische Klärschlammbehandlung im bayerischen Abfallwirtschaftsplan favorisiert wird und ab 2029 durch die Klärschlammverordnung weiter forciert wird. (AbfPV 2014).

Ein zentraler Punkt bei der Vorbehandlung des Schlammes ist seine Entwässerung. Nähere Ausführungen dazu enthält Kapitel 5.1. Anschließend kann eine (Teil-)Trocknung des Schlammes als Vorbereitung für eine weitergehende thermische Behandlung erfolgen. Die thermischen Entsorgungsmöglichkeiten werden im Kapitel 6 näher erläutert. Speziell für Schlammbehandlung bei kleinen und mittleren Kläranlagen ist ein gesonderter Leitfaden im [Publikationsshop](#) des LfU verfügbar (LfU 2023).

Im Folgenden wird aufgezeigt, welche Auswirkungen sich bei ausschließlich thermischer Verwertung für verschiedene Kläranlagengrößen im Rahmen eines regionalen Klärschlammmentsorgungskonzeptes ergeben können. Abbildung 5 stellt beispielhaft die mögliche Struktur eines regionalen Entsorgungskonzeptes dar. Kleine Kläranlagen der Größenklassen (GK) 1+2 liefern ihren Nassschlamm zu einer in

der Nähe gelegenen größeren Kläranlage, die den Schlamm entwässert (blauer Kreis). Zum weiteren Wasserentzug können bei den Kläranlagen der GK 4 Trocknungsanlagen installiert sein. Die entwässerten oder getrockneten Schlämme werden zur thermischen Behandlung der zentralen Anlage einer großen Kläranlage zugeführt. Dort können ggf. auch direkt Nassschlämme angeliefert werden.

Alternativ sind die Entwässerung, Trocknung und thermische Behandlung unabhängig von einer Kläranlage möglich. Diese Möglichkeiten sind schematisch rechts in Abb. 5 dargestellt. Die Entwässerung kann im Verbund oder durch einen Dienstleister mittels einer mobilen Anlage erfolgen. Klärschlamm-trocknungsanlagen sind in der Regel an Standorte mit einer Abwärmequelle verknüpft, etwa Biogasanlagen oder thermische Produktionsanlagen.

Zu den Anlagen, die Nassschlamm abfahren, gehören z. B. Abwasserteiche, kleine Kläranlagen mit aerober Schlammstabilisierung und kleine Tropfkörperanlagen. Bei diesen Kläranlagen ist es in der Regel unwirtschaftlich, den Schlamm mit eigenen stationären Entwässerungsaggregaten zu entwässern.

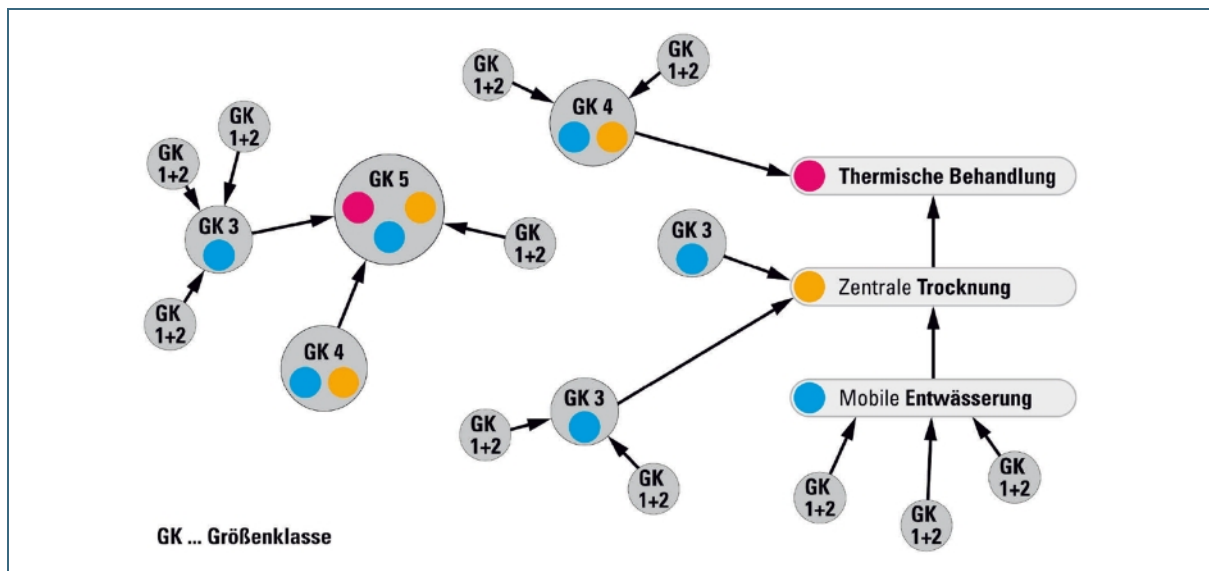


Abb. 5: Aufbau eines regionalen Klärschlammkonzeptes

Bei der Entwässerung mit einem mobilen Aggregat ist die stoßweise Rückbelastung durch das Schlammwasser mit zu betrachten (s. Kapitel 5.1). Mangels Speichervolumen ist eine gedrosselte Zugabe des abgepressten Wassers bei kleinen Anlagen oftmals nicht möglich. Es könnte zur Überlastung der Kläranlage und zu Überschreitungen der Anforderungswerte und somit zu negativen Auswirkungen auf das Gewässer kommen. Im Übrigen sind Kläranlagen kleiner 5.000 EW in der Regel nicht auf Nitrifikation und Stickstoffentfernung ausgelegt. Die zusätzliche Zuleitung von ammoniumreichem Schlammwasser kann zur Erhöhung des stark sauerstoffzehrenden Ammoniums und zur Bildung von fischgiftigem Ammoniak im Gewässer im Gewässer führen. Zum Abtransport des Nassschlammes zu größeren Kläranlagen sollten bei kleinen Kläranlagen geeignete Zufahrtswege für LKWs vorhanden sein. Im Rahmen größerer Entsorgungsgemeinschaften (siehe Kapitel 9) könnte das Problem des abgepressten Wassers ggf. durch mobile Lagerbehälter und organisatorischer Abstimmung der einzelnen Kläranlagen gelöst werden.

Bei den Anlagen mit eigener Trocknung handelt es sich im Regelfall um Kläranlagen in einer Größenordnung von 10.000 EW und größer (Größenklasse 4 und 5). Sie benötigen gegebenenfalls Annahmestationen für Fremdschlämme. Viele Anlagen dieser Größenordnung besitzen eine anaerobe Schlammstabilisierung. In dem Fall können angelieferte Fremdschlämme auch energetisch in der

Faulung genutzt werden. Dabei muss geprüft werden, ob die Kläranlage ausreichende Kapazitäten zum Abbau des zusätzlich eingebrachten Stickstoffs hat. Ob eine zusätzliche Trocknung wirtschaftlich ist, muss im Einzelfall unter Berücksichtigung des weiteren Entsorgungswegs und des Energiebedarfs geprüft werden. Durch eine Trocknung wird die zu entsorgende Klärschlammmenge stark reduziert. Andererseits stellt sie einen erheblichen technischen, energetischen und finanziellen Aufwand dar. Aus Klimaschutzgründen ist die Trocknung mit fossilen Energieträgern zu vermeiden. Die Nutzung von überschüssiger Abwärme, solarer Energie oder einer Kombination thermischer und solarer Trocknung ist unter diesem Aspekt zu bevorzugen.

Anlagen zur thermischen Behandlung von Klärschlamm sind in der Regel ab einer bestimmten Größe wirtschaftlich. Als Standorte kommen daher im Regelfall nur sehr große Kläranlagen in Frage, wobei der günstigste Standort für eine thermische Behandlung auch unabhängig vom Kläranlagenstandort gewählt werden kann. Es kann sich auch anbieten, die Klärschlammmonoverbrennung am Standort einer großen thermischen Abfallbehandlungsanlage einzurichten. Hierdurch kann sich ein erheblicher Synergieeffekt ergeben. Bei Kläranlagen mit eigener thermischer Behandlung am Standort der Kläranlage kann die anaerobe Stabilisierung mit Faulgasgewinnung möglicherweise wegfallen, um den Heizwert des Klärschlammes vollständig auszunutzen.

4.2 Rahmenbedingungen durch die Klärschlammverordnung

Mit Hinblick auf eine zukunftsichere Klärschlammverwertung sind die Maßgaben der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) inklusive der Folgeänderungen für 2029 und 2032 zu berücksichtigen. Schematisch sind die Möglichkeiten in Abb. 6 zusammengefasst.

Mit 2029 gilt die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung oder zu einer stofflichen Verwertung unter Nutzung des Phosphorgehalts für alle Klärschlämme mit mindestens 20 g P/kg TM (entspricht 2 %), unabhängig von der Größenklasse der Kläranlage.

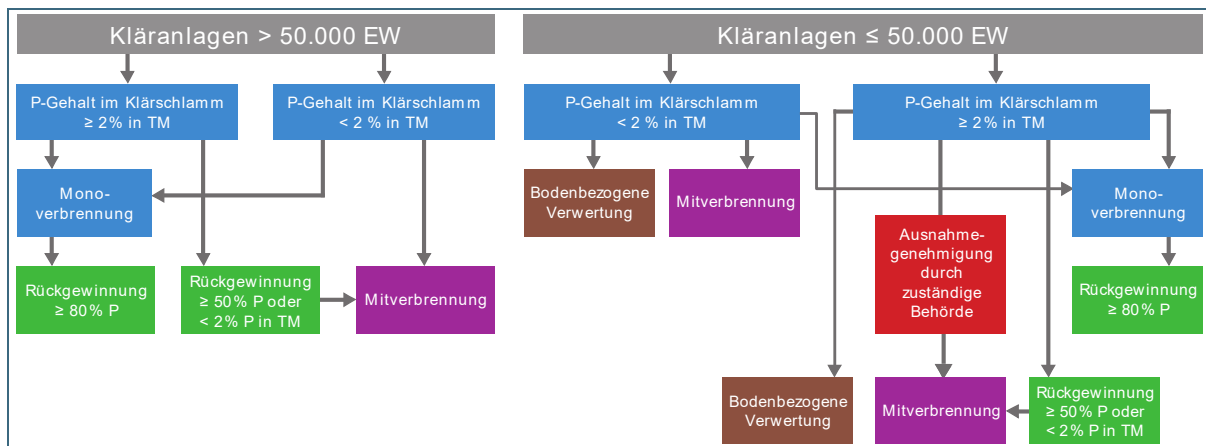


Abb. 6: Möglichkeiten zur Klärschlammverwertung ab 2029 gemäß Folgeänderungen der AbfKlärV; bis Ende 2031 ist die bodenbezogene Verwertung oder eine Ausnahmegenehmigung der Behörde für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von maximal 100.000 EW möglich.

Die Monoverbrennung des Klärschlammes mit einer Phosphorrückgewinnung aus der Asche ist der für alle Klärschlämme mögliche Verwertungspfad. Die Phosphorrückgewinnung kann auch direkt in die Klärschlammmonoverbrennung integriert sein, damit die Asche besser als Düngemittel verwendet werden kann.

Die Mitverbrennung ist eingeschränkt: Dieser Pfad ist zukünftig nur noch möglich, falls

- der Phosphorgehalt im Klärschlamm sicher unter 2 % der Trockenmasse liegt,
- durch eine vorherige Phosphorrückgewinnung der Phosphorgehalt auf unter 2 % der Trockenmasse gesenkt oder 50 % des Phosphors rückgewonnen wird oder
- bei Kläranlagen bis 50.000 EW (bis Ende 2031 maximal 100.000 EW) und einem Phosphorgehalt über 2 % der Trockenmasse eine anderweitige Abfallentsorgung durch die zuständige Behörde gewährt wird.

Die bodenbezogene Verwertung ist ab 01.01.2032 nur noch möglich, falls der Klärschlamm aus Anlagen mit einer Ausbaugröße von maximal 50.000 EW (ab 2029 maximal 100.000 EW) stammt. Zusätzlich sind die klärschlammbezogenen Grenzwerte aus der AbfKlärV zu erfüllen.

4.3 Datenerhebung und Konzepterstellung

Als Voraussetzung für die Erstellung eines Klärschlammkonzeptes sollten mindestens die folgenden Grunddaten erhoben werden (s. Erhebungsbogen im Anhang, Seite 64):

- Standort, Art, Betreiberdaten und Ausbaugröße der Kläranlagen
- Auslastung der Kläranlagen
- Art der Phosphatelimination
- Phosphorgehalt im Klärschlamm
- anfallende Klärschlammengen (m^3/a , % TR)
- Art der Schlammstabilisierung (z. B. Faulung)
- Schlammagerkapazitäten (Speichergröße, Möglichkeiten der Eindickung)
- Art der maschinellen Klärschlammmentwässerung und erreichbare TR-Gehalte
- Kapazitätsauslastung der Entwässerungsaggregate
- Zufahrtswege für mobile Entwässerung
- Speicherungsmöglichkeiten für das Filtrat (Presswasser)
- bisherige Entsorgungswege für den Klärschlamm (mit Mengenangaben)
- Kosten der bisherigen Klärschlammmentsorgung
- mögliche Aufstellflächen für Entwässerungs- und Trocknungsaggregate
- überschüssige Wärmeenergie

Die Klärschlamm-trocknung sollte zumindest optional als Baustein in einem Entsorgungskonzept betrachtet werden. Für die Ermittlung eines potenziellen Standortes für eine Trocknungsanlage sind folgende Angaben relevant:

- Platzkapazitäten (ggf. freie Hallen)
- Entfernung zur Wohnbebauung
- Zufahrtsmöglichkeiten
- Betreiber (Kläranlage, Fremdunternehmer etc.)
- Qualifikation des Betriebspersonals
- Belange des Landschafts-, Natur- und Umweltschutzes (Beachtung von Schutzgebieten)
- Klärung der Akzeptanz in der Bevölkerung
- Wärmequellen (z. B. Abwärme vom BHKW der Klärgasverwertung oder einer Biogasanlage, Abwärme einer Abfallverbrennungsanlage oder eines Gewerbebetriebs, Wärme aus Abwasser, Solarwärme).
- Möglichkeiten der Brüdenbehandlung (siehe Nr. 5.2.5)

Die Möglichkeiten zur thermischen Behandlung von entwässertem und getrocknetem Klärschlamm sind zu erheben und darzustellen. Es sollten sowohl kleinräumige, d. h. dezentrale Lösungen (z. B. gemeinsame Errichtung einer eigenen (Mono-)Verbrennungsanlage) als auch zentrale Lösungen untersucht und unter technischen, wirtschaftlichen, ökologischen und sozialen Gesichtspunkten bewertet werden.

Der Aspekt der Phosphorrückgewinnung muss bei der Konzepterstellung einbezogen werden. Dies betrifft mögliche Maßnahmen sowohl auf den Kläranlagen als auch nach einer thermischen Behandlung des Klärschlammes.

Bei der Erstellung eines Entsorgungskonzeptes sind für ein definiertes Gebiet verschiedene Entsorgungsketten als Varianten mit ihren ökonomischen und ökologischen Auswirkungen herauszuarbeiten. Insbesondere im ländlichen Raum stellt die kommunale Zusammenarbeit einen bedeutenden Faktor dar. Ein Klärschlamm-entsorgungskonzept soll die lokalen Entscheidungsträger in die Lage versetzen, eine für das betrachtete Gebiet geeignete Entsorgungsvariante zu finden.

5 Entwässerung und Trocknung

5.1 Entwässerung

Entwässerter Klärschlamm weist in der Regel einen Trockenrückstand (TR) von 20 – 35 % auf. Für die Entwässerung stehen verschiedene Technologien wie Zentrifugen, Bandfilter-, Kammerfilter- oder Schneckenpressen zur Verfügung. Weiterhin kann zwischen stationärer und mobiler Entwässerung unterschieden werden. Bei mobiler Entwässerung wird in bestimmten zeitlichen Abständen ein Entwässerungsaggregat an der Kläranlage aufgestellt und der gespeicherte Nassschlamm entwässert. Die Entwässerung erfordert ausreichend große Speicher sowohl für den Nassschlamm als auch für das bei der Entwässerung anfallende Schlammwasser.

Ausführliche Informationen zum Thema „Maschinelle Schlammmentwässerung“ können den Merkblättern DWA M-366 und DWA M-383 entnommen werden (DWA 2013, 2019). Des Weiteren wird auf den LfU-Leitfaden „[Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen](#)“ verwiesen (LfU 2023).

Das Schlammwasser ist hauptsächlich mit organischen Verbindungen, Stickstoff (überwiegend in Form von Ammonium) und Phosphor belastet. Gemäß einer Untersuchung der Universität der Bundeswehr München beträgt die Stickstoffrückbelastung (also die Rückführung von im Filtrat gelöstem Ammoniumstickstoff in den Kläranlageneinlauf) durchschnittlich 4 % des Zulaufs bei kontinuierlicher Rückführung (2023). An gleicher Stelle wird ein Extrembeispiel bei diskontinuierlicher Rückführung beschrieben: Würde der Schlamm aus 120 Tagen innerhalb eines Tages entwässert und das Schlammwasser direkt wieder in die Kläranlage verbracht, ergäbe sich für eine beispielhafte Kläranlage eine Rückbelastung von 436 % relativ zum Kläranlagenzulauf. Daher ist eine gedrosselte Zugabe des Schlammwassers in die Kläranlage sehr wichtig, um Belastungsspitzen sowie ein Überschreiten der Anforderungswerte und somit schädigende Auswirkungen auf das Gewässer zu vermeiden. Statt einer Zugabe in den Hauptstrom der Kläranlage kann das Schlammwasser auch separat im Teilstrom behandelt werden. An Standorten, wo diese Rahmenbedingungen nicht eingehalten werden können, kann keine Klärschlammmentwässerung erfolgen.

Die Entwässerungsgrade lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Zwischen 15 und 20 % TR ist Klärschlamm flüssig bis breiartig und pumpfähig.
- Zwischen 20 und 35 % TR weist Klärschlamm eine stichfeste, noch plastische, schmierende Konsistenz auf.

5.2 Trocknung

5.2.1 Allgemeines

Entwässertem Klärschlamm kann – abhängig vom nachfolgenden Entsorgungsverfahren – durch Trockner noch weiter Wasser entzogen werden. Voraussetzung für die Trocknung ist in der Regel eine vorherige Entwässerung auf einen TR-Gehalt von über 20 %. Durch die Trocknung werden TR-Gehalte von 40 bis 95 % erreicht. Prinzipiell gilt für alle Trocknungsverfahren: je höher der Entwässerungsgrad, umso weniger thermische Energie muss bei der Trocknung zur Verdampfung des Wassers aufgewendet werden und umso wirtschaftlicher kann die Trocknung betrieben werden.

Die Trocknung des Schlamms bewirkt eine Volumen- und Massenreduktion und reduziert in der Folge Aufwendungen für Transport und Entsorgung. Vor allem aber erhöht eine Trocknung den Heizwert des Klärschlammes wesentlich. Weitere Vorteile von getrocknetem Klärschlamm sind seine Verminderung der Geruchsintensität, eine erhöhte biologische Stabilität und die gute Lagerfähigkeit.

Die einzelnen Trocknungsgrade lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Von 40 bis 65 % TR ist Klärschlamm klebrig. Diese Phase wird auch als Leimphase bezeichnet. Sie kann bei Trocknern und Verbrennungsanlagen aufgrund von Anbackungen erhebliche Betriebsprobleme verursachen.
- Zwischen 65 und 85 % TR ist Klärschlamm fest und streufähig.
- Zwischen 85 und 95 % TR ist er feinkörnig und der Staubanteil steigt an. Ab etwa 90 % TR wird von einer Volltrocknung gesprochen.

Eine wesentliche Randbedingung für die Trocknerauswahl stellt die Beschaffenheit der Wärmequelle, insbesondere deren Temperaturniveau, dar. Weitere Aspekte sind der Platzbedarf, der gewünschte Trocknungsgrad, die Beschaffenheit, der Stabilisierungsgrad des Klärschlammes, auftretende Geruchsemissionen sowie die Behandlung des Abgases.

Für die öffentliche Akzeptanz der Klärschlamm-trocknung sind etwaige Geruchsemissionen ein wesentlicher Faktor. Die Geruchsemissionen sind durch die Schlammart bedingt, insbesondere ungenügend stabilisierte Schlämme verursachen hohe Geruchsemissionen. Auch höhere Temperaturen führen ohne geeignete Abgasbehandlung⁵ zu stärkeren Geruchsemissionen. Bei thermischen und solarthermischen Trocknern ist stets eine Abgasreinigung, etwa durch einen sauren Wäscher zur Ammoniakabscheidung und einen Biofilter zur Reduktion organischer Geruchsstoffe, notwendig.

Insbesondere bei Kontakt-trocknern ist zu beachten, dass die Brüden kondensiert werden müssen. Dies führt zu einer entsprechenden Rückbelastung auf die Kläranlage. Wenn Schlämme anderer Kläranlagen mitgetrocknet werden oder die Klärschlamm-trocknung nicht direkt auf einer Kläranlage stattfindet, kann eine separate Behandlung des Brüdenkondensats erforderlich werden.

Zudem sind bei der Verfahrensauswahl die Annahmekriterien geeigneter Klärschlamm-verwerter zu berücksichtigen. So werden solargetrocknete Schlämme teilweise abgelehnt, weil diese aufgrund der saisonalen Abhängigkeit des Trocknungsergebnisses, abhängig von der Verfahrenstechnik, zu Problemen in der Klärschlamm-verbrennung führen können.

5.2.2 Verfahrensprinzipien

Klärschlamm-trocknungsanlagen lassen sich anhand verschiedener Kriterien einordnen. Im Folgenden wird die „Art der Wärmeübertragung“ für eine Unterteilung der verschiedenen Anlagenarten herangezogen. Dabei wird unterschieden zwischen Konvektions-, Kontakt- oder Strahlungstrocknung.

In dieser Planungshilfe werden nur die gebräuchlichsten Trocknerarten beschrieben. Darüber hinaus existieren noch weitere Anlagentechniken, die jedoch in Bayern oder keiner oder untergeordneter Bedeutung sind. Eine sehr fundierte Darstellung der Klärschlamm-trocknung ist in der Literatur zu finden (2019). Eine detaillierte Beschreibung der im Folgenden skizzierten Trocknerarten findet sich im Merkblatt DWA M-379 (DWA 2021). Darin werden weitere Trockner und Trocknerkombinationen beschrieben.

5.2.3 Trocknerarten

Vorbemerkung: Konvektions- und Kontakt-trockner werden im Folgenden zur Abgrenzung von „Solar-trocknern“ analog zu ihrer üblichen Bezeichnung in der Literatur auch als „thermische Trockner“

⁵ Der Begriff „Abgas“ wird in dieser Planungshilfe gemäß der Begriffsbestimmung der TA Luft 2021 verwendet. Dergemäß sind Abgase „Trägergase mit den festen, flüssigen oder gasförmigen Emissionen.“ Gemäß TA Luft wird Abgas synonym für Abluft verwendet.

bezeichnet. Diese Abgrenzung ist streng genommen nicht korrekt, da auch Solartrockner und insbesondere solarunterstützte Trockner thermische Trocknungsverfahren darstellen.

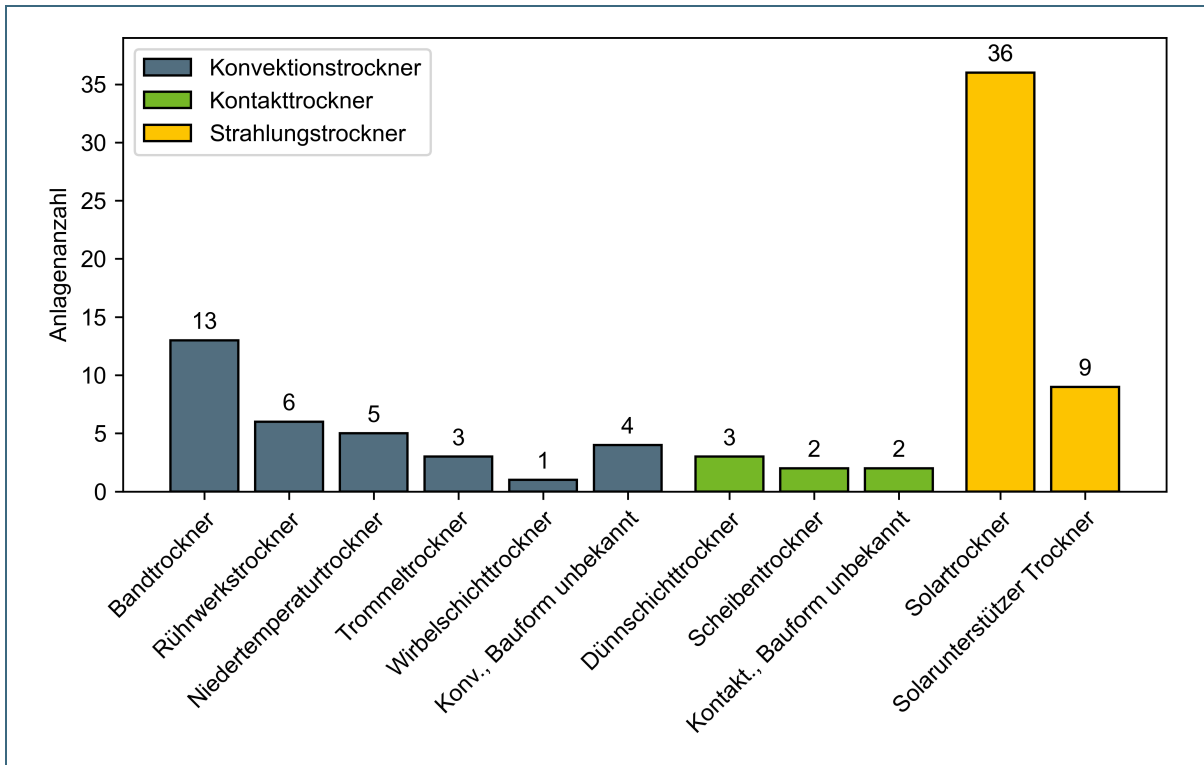


Abb. 7: Übersicht über in Bayern betriebene einzelne Trocknersysteme

Abbildung 7 zeigt die in Bayern zum Stand 2024 betriebenen Trocknersysteme für Klärschlamm. Zu beachten ist, dass das nominelle Übergewicht der solaren Trocknungsanlagen durch die meist höheren Durchsätze der thermischen Trockner in Bezug auf den Gesamtdurchsatz relativiert wird.

Eine weitergehende Darstellung von Verfahrensmerkmalen mit Energiekennzahlen sowie Vor- und Nachteilen der verschiedenen Verfahren findet sich im Merkblatt DWA M-379 (DWA 2021).

5.2.3.1 Konvektionstrockner

Bei Konvektionstrocknern wird die Trocknungsenergie durch Brennerabgas oder erhitzte Luft auf das Trockengut übertragen. Das heiße Gas durchströmt direkt den Klärschlamm und das verdampfende Wasser geht in das Heizmedium über.

Üblicherweise rangiert die Temperatur beim Einsatz von warmer Luft im Bereich von 70 °C bei Niedertemperaturanwendungen bis 150 °C. Bei Verwendung von Rauchgas werden auch Heiztemperaturen bis 600 °C angesetzt, wobei die Ausnutzung geringerer Temperaturniveaus im Sinne der Energieeffizienz an Bedeutung gewinnt.

5.2.3.2 Kontakttrockner

In Kontakttrocknern wird die Wärme über beheizte Flächen auf den zu trocknenden Schlamm übertragen. Als Heizmedium kommt im Regelfall Dampf oder Thermoöl mit 130 – 180 °C, bei Thermoöl auch bis 300 °C zum Einsatz. Da das Heizmedium nicht mit dem Wasserdampf gemischt wird, weist das Abgas (auch Brüden) einen sehr hohen Wassergehalt auf und wird nur durch Leckluft und aus dem Klärschlamm ausgasende Stoffe (vor allem Kohlenstoffdioxid, Methan und Ammoniak) verdünnt. Im Sinne einer möglichst hohen Energieeffizienz kann die durch die Brüdenkondensation entnommene Wärme durch entsprechende verfahrenstechnische Anpassung zurückgewonnen werden. Dies ist

etwa durch eine mehrstufige Trocknung und/oder Wärmepumpentechnik möglich. (Heindl, Ritterbusch 2024)

Kontaktrockner sind insbesondere zur Teiltrocknung auf 40 – 45 % TR geeignet, eine Volltrocknung ist auch möglich.



Abb. 8: Trocknerband mit Klärschlamm-Presslingen

5.2.3.3 Strahlungstrockner

Sämtliche in Bayern betriebenen Strahlungstrocknern nutzen die Sonneneinstrahlung als Wärmequelle. Andere Strahlungsquellen, wie Infrarotlicht oder Elektromagnetismus spielen in der Praxis keine Rolle.

Bei der rein solaren Trocknung wird der Klärschlamm mit Hilfe der Sonnenstrahlung in Hallen mit transparenten Außenhüllen aus Glas oder Kunststoff getrocknet. Der Trocknungsvorgang erfolgt durch direkte Sonneneinstrahlung und konvektiven Wärmeeintrag über die erwärmte Luft im Trockner. Der Klärschlamm wird kontinuierlich umgewälzt, um das im Schlamm gebundene Wasser mit der Innenluft im Trockerraum in Kontakt zu bringen und die Entstehung anaerober Zonen zu vermeiden.

Die Umwälzung des Schlammbeets mit einer Füllhöhe von üblicherweise 10 – 40 cm erfolgt durch Wenderoboter, kettengezogene Rechensysteme oder andere maschinelle Wendeapparaturen. Die Wendeapparaturen fördern durch die Halle oder rückvermischen mit Trockengut.

Bei der solarunterstützten Trocknung wird zusätzliche Heizenergie aus Abwärmequellen eingebracht. Soweit eine solche Abwärmequelle verfügbar ist, ist die solarunterstützte Trocknung die Regel. Hierbei kann die Wärmeenergie sowohl durch Einblasen von warmer Luft in die Trockenhalle als auch durch Beheizung des Hallenbodens erfolgen.



Abb. 9: Solarunterstützte Klärschlamm-trocknung mit Rechen zur Schlammumwälzung

Saisonbetrieb der solaren Trocknung

Die rein solare Trocknung ist naturgemäß stark jahreszeitabhängig. In den sonnenarmen Jahreszeiten muss somit mit längeren Aufenthaltszeiten gerechnet werden. Deswegen müssen die entsprechenden Speichermöglichkeiten für den Nassschlamm oder den entwässerten Schlamm vorhanden sein. Dies kann vermieden werden, wenn die verringerte Strahlungsenergie durch eine alternative Energiequelle ausgeglichen werden kann. Hierfür bietet sich die Nutzung von Abwärme an. Je stärker die solare Trocknungsanlage ohnehin durch Ausnutzung von Abwärme getragen wird (es existieren Anlagenkonzepte mit einem Abwärmeanteil von bis zu 80 %), umso unabhängiger ist diese von saisonbedingten Schwankungen der Sonneneinstrahlung. Diese solarunterstützten Anlagen haben jedoch einen wesentlich höheren verfahrenstechnischen Aufwand als rein solare Anlagen. Auch Emissionen in die Atmosphäre sind auf Grund des höheren Energieeintrags und der höheren Durchsätze bei diesem Anlagentyp wesentlich höher als bei rein solaren Anlagen.

Abgasreinigung

Bei der Neuerrichtung solarunterstützter Trocknungsanlagen geht die Tendenz dahin, eine Abgasbehandlung vorzusehen, um insbesondere Belästigungen durch Geruchsimmissionen auszuschließen und Ammoniakimmissionen zu vermindern.

Nachteilig ist hierbei das große Luftvolumen, das bei der solarunterstützten Trocknung über die Abgasreinigung geführt werden muss und somit die Abgasbehandlung verteuert.

Ob eine Abgasreinigung für solare Trocknung erforderlich ist, hängt von verschiedenen Faktoren ab:

- Standort der Anlage (Entfernung zu den nächstgelegenen Immissionsorten)
- orografische und meteorologische Gegebenheiten (z. B. Kaltluftabflüsse, Hauptwindrichtung, Inversionswetterlagen)
- Klärschlamm- und Luftdurchsatz
- Trockentemperaturen (höhere Temperaturen verursachen tendenziell höhere Geruchsemissionen)
- geruchliche Vorbelastungen
- Geruchsqualität der Klärschlämme

Insbesondere die Geruchsqualität der angelieferten Schlämme ist im Planungsstadium nur schwer abzuschätzen, da diese Änderungen unterliegen kann. So kann sich die Geruchsqualität eines Klärschlammes z. B. bei längeren Kaltwetterperioden bei aerob stabilisierten Schlämmen kurzfristig verschlechtern. Daneben gibt es auch große Unterschiede je nach Art und Qualität der angewandten Schlammstabilisierung. Auch die Art der Klärschlämme und deren Herkunft können großen Einfluss auf die Geruchsqualität des zu trocknenden Klärschlammes haben.

Bei solarunterstützten Klärschlamm-trocknungsanlagen können trotz geringer zu erwartender Konzentrationen auf Grund der hohen Volumenströme erhebliche Ammoniakfrachten emittiert werden. Falls stickstoffempfindliche Ökosysteme oder Wälder im Anlagenumfeld vorzufinden sind, können auch Ammoniakemissionen entscheidungsrelevant sein für die Frage, ob eine Abgasreinigungsanlage installiert werden muss. Dies kann durch eine Immissionsprognose überprüft werden. Zur Beurteilung können unter anderem die Vorgaben des Anhangs 1 der TA Luft sinngemäß herangezogen werden (TA Luft 2021), gegebenenfalls ist eine FFH-Vorprüfung notwendig.

Als Abgasreinigung kommt in der Regel ein Biofilter mit vorgeschaltetem saurem Wäscher in Frage. Der Aufwand für eine Abgasreinigung ist auf Grund der hohen Luftdurchsätze in Verbindung mit geringen Schadstoffkonzentrationen vergleichsweise hoch.

Sofern Standortverhältnisse nicht als sehr günstig eingestuft werden können, sollten die Auswirkungen geplanter Anlagenstandorte auch mit einer Geruchsimmissionsprognose überprüft werden. Auf Grund der Unwägbarkeiten in Bezug auf künftige Schlammqualitäten ist unbedingt darauf zu achten, dass Geruchs-Immissionsprognosen immer mit worst-case-Annahmen durchgeführt werden. Ansonsten können im Nachhinein – bei berechtigten Beschwerden zu erheblichen Geruchsbeeinträchtigungen – mit hohen Kosten verbundene wesentliche Umbauten der Anlage und die nachträgliche Installation einer Abgasreinigungseinrichtung erforderlich werden.

Dabei ist in Anhang 7 der TA Luft 2021 zu beachten, dass die durch die Geruchsimmissions-Richtlinie (GIRL) vorgegebenen Immissionswerte nicht durch eine Anlage alleine ausgeschöpft werden dürfen (GIRL 2009).

5.2.4 Wärmerückgewinnung sowie Brüden- und Abgasbehandlung

Das mit Wasserdampf gesättigte Abgas der thermischen Trockner nennt man Brüden. An den Trocknungsvorgang schließt sich – mit Ausnahme der Solar- und Niedertemperaturtrockner – eine Brüdenbehandlung an.

Die bei der Trocknung des Klärschlammes entstehenden Brüden enthalten die latente Wärme aus der Wasserverdampfung. Werden die Brüden wieder kondensiert, so wird diese latente Wärme wieder frei und kann genutzt werden. Die zurück gewonnene Wärme wird meist zur Heizung von Betriebsräumen

und Faulbehältern sowie zur Schlammkonditionierung verwendet. Werden die Brüden verdichtet und somit über 100°C erwärmt, so können sie selbst zur Verdampfung von Schlammwasser dienen.

Im Anschluss an die Kondensation der Brüden erfolgt bei thermischen Trocknern im Regelfall eine Entstaubung bzw. Partikelabscheidung durch einen Zyklon oder Gewebefilter. Im nächsten Schritt ist eine Nasswäsche des Abgases zur Entfernung von Ammoniak notwendig. Das so vorgereinigte Abgas kann beispielsweise in einem nachgeschalteten Biofilter oder -wäscher von Geruchsstoffen befreit werden. Statt Biofiltern oder -wäschern werden auch UV-Oxidationsanlagen zur Verringerung der Geruchsfracht und des Anteils an organischen Kohlenstoffverbindungen eingesetzt. Die auskondensierten Brüden werden normalerweise in der Abwasserbehandlungsanlage gereinigt.

Da bei Solar- und Niedertemperaturtrocknern anfallende feuchte Abgas weist durch das niedrige Temperaturniveau einen eher geringen Wasserdampfgehalt auf. Es entstehen keine zu reinigenden Brüden. Aus diesem Grund kann jedoch die in den Brüden enthaltene Wärmeenergie auch nicht zurückgewonnen werden.

5.2.5 Energiebedarf für die Klärschlamm-trocknung

Da der Großteil der thermischen Energie unabhängig vom verwendeten Verfahren für die Verdampfung des Wassers benötigt wird, sind die Unterschiede zwischen den einzelnen Anlagentypen nicht sehr ausgeprägt.

Wesentlich für die Reduzierung des Bedarfs an thermischer Energie sind neben der Rückgewinnung von Kondensationswärme aus den Brüden v. a. der Entwässerungsgrad der zu trocknenden Schlämme und der angestrebte Trocknungsgrad. Eine der Trocknung vorgeschaltete weitgehende Entwässerung ist zu empfehlen.

Im Durchschnitt kann bei Konvektions- und Kontakt-trocknern mit einem spezifischen Wärmebedarf von 800 – 900 kWh/t verdampftes Wasser gerechnet werden. Im Einzelfall ist der jeweilige Wärmebedarf des in Frage stehenden Trockners zu verwenden. Zusätzlich fällt für Peripherie, Förderung usw. ein elektrischer Energiebedarf von 40 – 85 kWh/t verdampftes Wasser an. (Heindl, Ritterbusch 2024)

Bei Niedertemperaturanwendungen, etwa bei solarthermischen Trocknersystemen und Konvektionstrocknern, ist der spezifische Wärmebedarf etwas höher. Dies ist durch den geringeren Wassergehalt bedingt, den die Luft bei abnehmender Temperatur aufnehmen kann. Abhängig vom konkreten Temperaturniveau steigt der Wärmebedarf auf 1.200 – 1.800 kWh/t verdampftes Wasser. Gleichzeitig wird durch die Temperaturabsenkung ein größerer Teil der verfügbaren niederkalorischen Wärme für die Trocknung ausgeschöpft. Der Wärmebedarf bei der solarunterstützten Trocknung mit Abwärmenutzung wird teilweise über die Sonneneinstrahlung (etwa 20 – 30 %) gedeckt. (Heindl, Ritterbusch 2024)

Bei rein solaren Trocknern wird naturgemäß keine zusätzliche Zufuhr thermischer Energie aufgebracht. Der Strombedarf ist, wenn keine Abgasreinigung notwendig ist, mit 20 – 40 kWh/t verdampftes Wasser eher gering. Saisonale Schwankungen in der Wärmeversorgung und der Witterungsverhältnisse sind hier verstärkt zu berücksichtigen. (Heindl, Ritterbusch 2024)

5.2.6 Vergleich der verschiedenen Verfahrensprinzipien

Der Vorteil solarunterstützter Trockner gegenüber Konvektions- oder Kontakt-trocknern liegt in der Reduzierung oder Ersetzung der notwendigen – über Feuerungsanlagen erzeugten – Wärmeenergie durch die Mitnutzung von Solarenergie. Anders stellt sich die Situation dar, wenn ausreichend Abwärme am Standort anfällt, die ansonsten ungenutzt an die Umgebung abgegeben wird. In diesem Fall sind in Bezug auf den Energieverbrauch lediglich die Stromverbräuche der verschiedenen Anlagenvarianten zu vergleichen. Die Stromverbräuche der solaren und solarunterstützten Anlagen sind

geringer als diejenigen der Konvektions- und Kontaktrockner. Auch dies relativiert sich für den Fall, wenn für eine solarunterstützte Trocknungsanlage eine Abgasreinigung notwendig wird.

Die Saisonalität der Trocknungsqualität ist ein wesentlicher Nachteil bei der Abgabe des Trockenguts an eine Klärschlammmonoverbrennung. Teilweise verweigern Klärschlammverwertungsanlagen die Annahme von solar getrockneten Klärschlämmen.

6 Thermische Entsorgungswege für Klärschlamm

Im folgenden Kapitel werden die vorherrschenden Techniken zur thermischen Klärschlamm Entsorgung beschrieben. Der Überblick erhebt bezüglich aller auf dem Markt angebotenen Technologien keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Da die bodenbezogene Verwertung für viele Klärschlämme keinen zukunftsfähigen Entsorgungsweg darstellt, ist eine thermische Behandlung mit anschließender Entsorgung der Rückstände erforderlich.

6.1 Mitverbrennung

6.1.1 Kohlekraftwerk

Die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken war bislang eine gängige Option für die Entsorgung von Klärschlamm. Dabei wird der Energieinhalt des Klärschlammes genutzt. In Bayern stand hier das Kohlekraftwerk Zolling der Onyx Germany GmbH im Landkreis Freising zur Verfügung. Dies hat aber nur noch eine netzsichernde Aufgabe, um Netzengpässe oder Spannungs- und Systembilanzprobleme abzufedern. Das am Standort des Kraftwerkes vorhandene Biomassekraftwerk übernimmt seit 2025 die Verbrennung des getrockneten Klärschlammes.

Der mit LKWs angelieferte entwässerte Klärschlamm wird über geschlossene Fördersysteme und Silos zu der Kohlenmühle transportiert. In der Mühle wird er gemeinsam mit der Kohle zu feinem Staub gemahlen und getrocknet. Die Verbrennung des Staubs erfolgt anschließend in den Brennern des Dampferzeugers.

Außerhalb Bayerns erfolgt die Klärschlammverbrennung meist in Braunkohlekraftwerken. Großteils werden entwässerte Klärschlamm eingesetzt, es kommt aber auch getrockneter Klärschlamm zum Einsatz. Für längerfristige Planungen ist diese Verwertung aufgrund des beschlossenen Kohleausstiegs nicht gesichert.

6.1.2 Zementwerk

Die Entsorgung von Klärschlämmen in Zementwerken ist etabliert und wird in vier bayerischen Zementwerken durchgeführt. Zementwerke nehmen je nach Standort Klärschlamm vollgetrocknet, also mit einem TR-Gehalt von über 90 %, oder mechanisch entwässert an. Manche Zementwerke betreiben einen Klärschlamm Trockner. Die Abgabe nach thermischer oder solarunterstützter Trocknung ist insbesondere bei längeren Transportwegen sinnvoll. Nach dem Trockenvorgang wird der Klärschlamm gemahlen und pneumatisch in die Hauptfeuerung eingeblasen.

Die brennbaren Bestandteile des Klärschlammes ersetzen fossile Primärbrennstoffe (in der Regel Steinkohle, Braunkohle) für den bei rund 1.450 °C ablaufenden Brennprozess zur Klinkerherstellung. Die Emissionen von fossilem CO₂ werden somit vermindert, wobei in der Zementindustrie bereits 2021 rund 70 % der thermischen Energiezufuhr mit „alternativen“, hauptsächlich abfallbasierten Brennstoffen erfolgte (VDZ 2022).

Neben der Nutzung des Energieinhalts des Klärschlammes werden auch die nicht brennbaren, anorganischen Bestandteile des Klärschlammes – insbesondere Silizium, Aluminium-, Eisen- und Calciumverbindungen – in die Klinkermatrix eingebunden.

Tabelle 2 enthält die Aufstellung der bayerischen Zementwerke, die regelmäßig Klärschlämme zur Mitverbrennung annehmen.

Tab. 2: Bayerische Zementwerke mit Klärschlammverbrennung

Standort	Betreiber
Harburg/Schwaben	Märker Zement
Karlstadt bei Würzburg	Schwenk Zement
Burglengenfeld	HeidelbergCement
Rohrdorf	Rohrdorfer Zement

Bei der Erstellung eines regionalen Entsorgungskonzeptes ist zu berücksichtigen, dass Zementwerke im Regelfall im Winterhalbjahr Revisions- und Stillstandszeiten von rund zwei Monaten haben. Für diese Zeit muss eine ausreichende Zwischenlagerkapazität vorhanden sein.

Der Einsatz von Klärschlamm in Zementwerken ist sowohl energetisch als auch stofflich limitiert. Auch bei vollgetrocknetem Klärschlamm ist der Heizwert noch geringer als für den Primärbrenner erforderlich um einen störungsfreien Betrieb zu gewährleisten (Zeschmar-Lahl et al. 2020). Daher müssen noch höherkalorische Brennstoffe zugeführt werden. Von stofflicher Seite stellt der hohe Phosphorgehalt eine Begrenzung des Klärschlammeinsatzes dar, da Phosphor mit steigendem Anteil im Klinker die Produktqualität beeinträchtigt. Zumindest ein Phosphorgehalt von 1 % im Klinker ist dabei noch unbedenklich (Puntke 2004).

Bei Zementwerken ist zudem der Quecksilbergehalt im Klärschlamm auf beispielsweise max. 1 mg/kg TM beschränkt, da keine spezielle Abscheideeinrichtung für leichtflüchtige Schwermetalle vorhanden ist. Die genauen Annahmebedingungen sind bei den jeweiligen Zementwerken im Einzelfall zu erfragen.

Durch den Verbleib der anorganischen Bestandteile des Klärschlammes in das Klinkermaterial ist eine Nutzung der Ressource Phosphor nicht mehr möglich. Zusätzlich ist, bei Anwendung der ab 2029 geltenden Pflicht zur Phosphorrückgewinnung die Mitverbrennung nicht mehr uneingeschränkt zulässig. Daher sollte dieses Verfahren nur bei Klärschlämmen erwogen werden, die bereits niedrige Phosphorgehalte < 20 g P/kg TM haben oder bei denen vorab eine Phosphorrückgewinnungsmaßnahme durchgeführt wurde.

6.1.3 Müllheizkraftwerk

Einige Müllverbrennungsanlagen entsorgen ebenfalls Klärschlamm gemeinsam mit dem Siedlungs- und Gewerbeabfall. In Bayern sind dies die Anlagen in Bamberg, Coburg, Ingolstadt, München und Würzburg.

Der entwässerte Klärschlamm wird dafür im Bunker gemischt und mit dem Hausmüll auf den Rost aufgegeben. Alternativ kann getrockneter Klärschlamm auch direkt in den Brennraum eingeblasen werden. Der Anteil des mitverbrannten Klärschlammes bezogen auf die gesamte verbrannte Müllmenge einer Anlage beträgt wenige Prozent.

Müllheizkraftwerke werden wie Zementwerke ab 2029 hauptsächlich für Klärschlämme in Frage kommen, die bereits niedrige Phosphorgehalte < 20 g P/kg TM haben oder bei denen vorab eine Phosphorrückgewinnungsmaßnahme durchgeführt wurde.

6.2 Monoverbrennung

Die bayerischen Klärschlammmonoverbrennungsanlagen besitzen Trocknungsanlagen, so dass auch entwässelter Klärschlamm angeliefert werden kann. In Bayern werden folgende Monoverbrennungsanlagen betrieben:

Tab. 3: Technische Konzeptionen von Monoverbrennungsanlagen in Bayern.

Betreiber	Vortrocknung	% TR	Verbrennungsprinzip	Kapazität t TM/a ⁶
Münchner Stadtentwässerung	Scheibentrockner	45	Wirbelschicht	24.000 (Ausbau auf 38.000 in Vorbereitung)
ZV Klärwerk Steinhäule, Neu-Ulm	Dünnschichttrockner	40	Wirbelschicht	24.000
InfraServ GmbH & Co. Gendorf KG	Scheibentrockner	50	Wirbelschicht	10.000
Gemeinschaftskläranlage Bayerischer Unterrmain GmbH	Dünnschichttrockner	40	Paddelofen	9.600
Fa. Emter Altstadt, Schongau	Kaskadentrockner, Bandrockner	70	Rostfeuerung	55.000
Fa. Zirngibl, Mallersdorf-Pfaffenberg	Rührwerkstrockner	92	Wirbelschicht	13.000

Die aktuell in Betrieb befindlichen Anlagen zur Klärschlammmonoverbrennung weisen eine Kapazität von 9.600 bis 65.000 t TM/a auf. Außerhalb Bayerns wurden in den letzten Jahren auch Anlagen kleinerer Kapazität errichtet, beispielsweise in Altenkirchen in Rheinland-Pfalz (etwa 4.500 t TM/a), im Breisgau mit einer Pilotanlage (etwa 2.600 t TM/a) oder auf Rügen (2.500 t TM/a) (Heidecke, Six 2024). Eine Anlage dieser Größenordnung war in Straubing in Form einer Rostfeuerung in Betrieb, wurde nach einigen Jahren aber wieder abgebaut.

6.2.1 Wirbelschichtverbrennungsanlagen

Münchner Stadtentwässerung, München

Die Münchner Stadtentwässerung betreibt auf dem Gelände der Kläranlage Gut Großlappen seit 1998 eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage nach dem Wirbelschichtverfahren. Der mittels Zentrifugen entwässerte Schlamm wird vor der selbstgängigen Verbrennung in Scheibentrocknern auf einen TR-Gehalt von etwa 45 % getrocknet. Zum Einsatz kommt nur betriebseigener ausgefauter Klärschlamm der Klärwerke Gut Marienhof und Gut Großlappen. Die Anlage verfügt über zwei parallele Verbrennungslinien mit einer Jahreskapazität von jeweils rund 24.000 t TM/a. Die Verbrennungslinien werden alternierend betrieben. Die Klärschlammverbrennungsasche wird zurzeit als Deponiebaumaterial verwertet. Diese Anlage deckt rund zwei Drittel des Münchener Klärschlammfalls ab, der Rest wird im dortigen Müllheizkraftwerk mitverbrannt.

Die Verbrennungskapazität der Anlage wird durch einen Neubau auf etwa 38.000 Mg TM/a erweitert. Wie bislang werden zwei Verbrennungsanlagen alternierend betrieben. Damit wird der in München

⁶ Die genehmigungsrechtlichen Kapazitäten werden im Regelfall nicht bezogen auf die Trockenmasse, sondern auf die Frischmasse bezogen. Daher handelt es sich hier um berechnete Werte.

anfallende Klärschlamm ab 2029 vollständig einer Monoverbrennung zugeführt und damit der erste wichtige Schritt für eine Phosphorrückgewinnung aus der Asche getan.

Zweckverband Klärschlammverwertung Steinhäule, Neu-Ulm

Ebenso betreibt der Zweckverband Klärschlammverwertung Steinhäule auf dem Gelände der Kläranlage Steinhäule, Neu-Ulm, eine Klärschlamm-Verbrennungsanlage nach dem Wirbelschichtverfahren. Der mittels Zentrifugen entwässerte Schlamm wird vor der selbstgängigen Verbrennung in Dünnschichttrocknern auf einen TR-Gehalt von etwa 40 % getrocknet. Zum Einsatz kommt neben betriebseigenem, nicht ausgefaultem Klärschlamm auch ausgefaulter Klärschlamm aus Kläranlagen der Region. Die Anlage verfügt über zwei parallele Verbrennungslinien mit einer Jahreskapazität von insgesamt rund 24.000 t TM/a. Die Klärschlammverbrennungsasche wird in der Düngemittelindustrie verwertet.

InfraServ GmbH & Co. Gendorf KG

Die Firma InfraServ GmbH & Co. Gendorf KG betreibt auf dem Gelände des Industrieparks Gendorf, Burgkirchen, eine Wirbelschichtverbrennungsanlage zur Monoverbrennung von Klärschlämmen mit einer Kapazität von rund 10.000 t TM/a. Neben der Entsorgung des Klärschlammes aus der betriebseigenen Kläranlage steht ein Teil der Kapazität auch für die Verbrennung von kommunalen Klärschlämmen zur Verfügung. Die anfallenden Aschen werden auf der werkseigenen Deponie abgelagert.

Zirngibl Verwertungs GmbH & Co., Mallersdorf-Pfaffenberg

In Breitenhart, einem Ortsteil der Gemeinde Mallersdorf-Pfaffenberg in Niederbayern, ist seit Januar 2025 eine Klärschlammmonoverbrennungsanlage durch die Zirngibl Verwertungs GmbH & Co. KG in Betrieb. Die Wirbelschichtverbrennung mit einer Kapazität von rund 13.000 t TM/a verwertet mechanisch entwässerten und getrockneten Klärschlamm. Eine Besonderheit der Anlage ist die Abtrennung der Flugasche direkt nach dem Brennraum durch zwei Heißgaszyklone, um die Rekondensation von flüchtigen Schwermetallen (vor allem Quecksilber und Cadmium) zu vermeiden und eine schwermetallabgereicherte Asche zu erzeugen. Die Zyklonasche wird in die Düngemittelindustrie abgegeben.

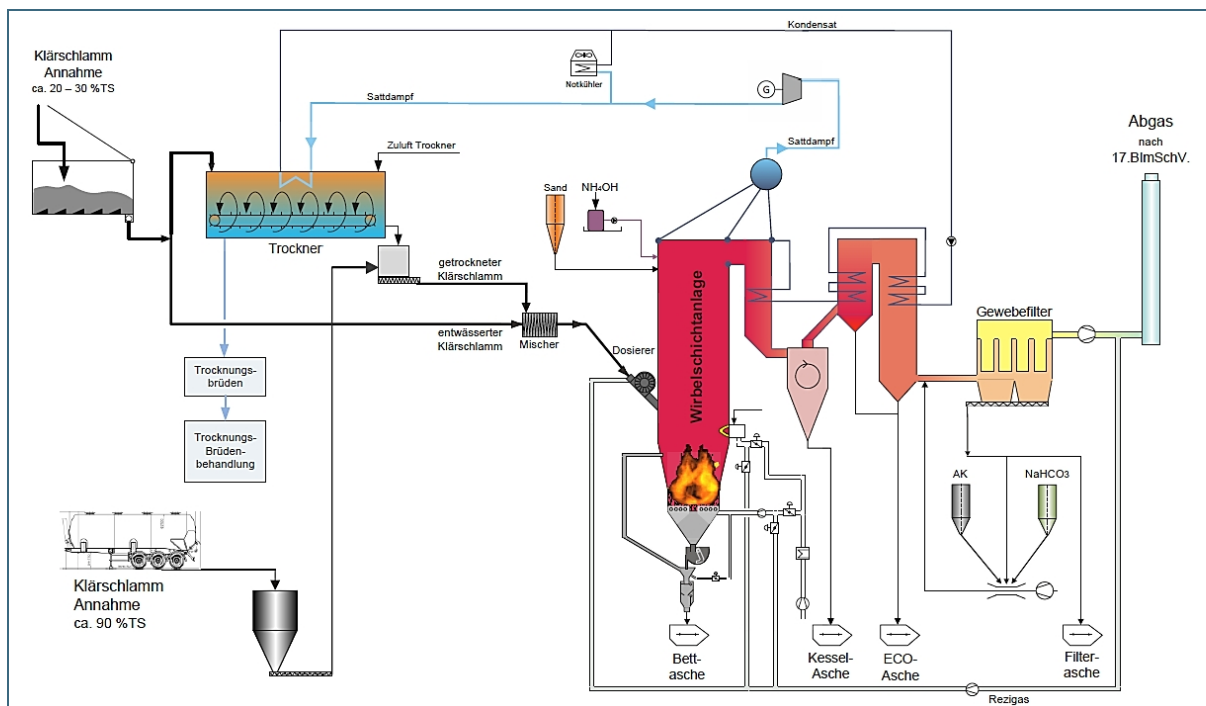


Abb. 10: Anlagenschema der Wirbelschichtverbrennung der Fa. Zirngibl

6.2.2 Rostfeuerungsanlage der Fa. Emter GmbH

In Altenstadt bei Schongau betreibt die Fa. Emter GmbH seit 2009 eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage mit Rostfeuerung. Die jährliche genehmigungsrechtliche Kapazität beträgt rund 55.000 t TM, berechnet aus den maximalen Einsatzmengen. Zum Einsatz gelangen vorwiegend entwässerte, aber auch getrocknete Klärschlämme aus der kommunalen Abwasserreinigung und der Lebensmittelindustrie. In untergeordneter Menge werden auch Dünnschlämme und flüssige Gärreste verbrannt.

Die Trocknung der Schlämme auf etwa 70 % TR erfolgt über einen Bandtrockner und einen Kaskadentrockner. Die für die Trocknung erforderliche Wärme wird dem Abhitzekessel entnommen. Die Anlage besteht aus zwei baugleichen Verbrennungslinien mit jeweils 6 MW Gesamtfeuerungswärmeleistung und einer gemeinsamen Abgasreinigung.

Zum Stand Januar 2025 wird der Plan verfolgt, vor der Verbrennung Additive (Alkalisalze) dem Klärschlamm vor der Entwässerung beizugeben und auf diesem Wege eine erhöhte Pflanzenverfügbarkeit und geringere Schwermetallgehalte in der resultierenden Asche zu erreichen (siehe Abschnitt 7.5.1).

6.2.3 Sonderformen der thermischen Klärschlammverwertung

Gemeinschaftskläranlage Bayerischer Unterrhein GmbH, Erlenbach

In der Gemeinschaftskläranlage in Erlenbach wird kommunales und industrielles Abwasser zusammen gereinigt, wobei aufgrund einer dort ansässigen Viskoseproduktion eine wesentliche Fracht an Zinksulfid in den Klärschlamm eingebracht wird.

Um diesen zinkhaltigen Klärschlamm zu behandeln, wird dort seit 2016 eine Klärschlammmonoverbrennung mit einem maximalen Durchsatz von 24.000 t Originalsubstanz/a Klärschlamm betrieben. Im Ofen wird entwässerter oder teilgetrockneter Klärschlamm mit auf mehreren Ebenen angeordnete Paddeln durch den Ofen gefördert, wobei der Klärschlamm eine mittlere Verweilzeit von 30 Minuten aufweist. In einer Nachbrennkammer wird die erforderliche Temperatur von mind. 850 °C für mindestens zwei Sekunden erreicht. Im Weiteren wird das Rauchgas durch einen Dampferzeuger und über eine mehrstufige Abgasreinigung geführt. Die zinkreiche Verbrennungsasche wird für die stofflich in einer Zinkverhüttung eingesetzt.

Vergasungsverfahren der Fa. Kopf SynGas GmbH & Co. KG

Die Firma Kopf SynGas GmbH & Co. KG bietet einen Vergasungsreaktor an, in dem in einer stationären Wirbelschicht unter Sauerstoffmangel (unterstöchiometrisch) und bei Temperaturen von bis zu etwa 900 °C aus dem getrockneten Klärschlamm (80 – 90 % TR) ein brennbares Gas entsteht.

Dieses Brenngas wird einer mehrstufigen Gasreinigung unterzogen und verbrannt. Je nach Anlagenkonzept wird die freiwerdende Energie in einer Kraft-Wärme-Kopplung zur Strome- und Wärmeproduktion genutzt oder rein thermisch für die Klärschlamm Trocknung eingesetzt. Es besteht auch die Möglichkeit, dass das Brenngas durch Einsatz in Zementwerken oder anderen thermischen Anlagen fossile Brennstoffe substituiert.

Referenzanlagen für dieses Verfahren befinden sich in Balingen, Mannheim und Koblenz. Die jeweilige Anlagenkapazität liegt bei 2.000 – 5.000 t TM/a, somit handelt es sich um kleine Anlagen der thermischen Klärschlammverwertung.

Vom Klärschlamm verbleibt ein inertes Granulat. Der Verbrennungsrückstand kann einer Phosphorrückgewinnung, z. B. über den nasschemischen Weg, zugeführt werden, sofern der Restkohlenstoff des Rückstands zu keinen Problemen beim Rückgewinnungsverfahren führt. In der Vergaserasche ist Phosphor zum größten Teil nur mineralsäurelöslich und nicht pflanzenverfügbar (Jacobi et al. 2022).

Pyrolyse-Verfahren

Die Pyrolyse ist eine thermische Behandlung bei 400 – 800 °C in reduktiver Atmosphäre unter Sauerstoffausschluss. Dabei fallen ein festes Pyrolysat und ein Abgas an. Das Abgas enthält verdampftes Wasser, verschiedene Gaskomponenten und diverse organische und anorganische Komponenten, die im Falle einer Gaskühlung auskondensierbar wären und ein teerartiges Pyrolyseöl bilden würden.

Bei den Anlagen der Firma Pyreg wird Klärschlamm in einem Doppelschneckenreaktor bei 500 – 700 °C pyrolysiert. Das Verfahren plant mit einem Durchsatz von 1.100 – 3.100 t TM/a pro Pyrolyseeinheit. Das Pyrolysegas wird einer Staubabscheidung unterworfen und dann in einem FLOX-Brenner (Flammenlose Oxidation) nachverbrannt. Das Abgas des Brenners wird zur Beheizung des Doppelschneckenreaktors eingesetzt, danach gekühlt und mittels Abgaswäscher und Aktivkohlefilter gereinigt. Mit der Verbrennung des entstehenden Gases unterliegen Pyrolyseanlagen den Anforderungen der Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV (17. BImSchV 2024).

Die 2015 in Betrieb genommene Anlage in Linz-Unkel wurde aufgrund steigender Betriebskosten und weil das Pyrolysat nicht als Düngemittel verwertbar ist 2023 außer Betrieb gesetzt (Rühle 2023). Eine weitere Anlage in Homburg wird seit 2016 betrieben. Im sächsischen Niederfrohna wird seit 2020 eine Klärschlammpyrolyse der Firma BIOMACON GmbH betrieben.

Der hessische Abwasserverband Main-Taunus betreibt eine weitere Pyrolyseanlage, das dabei entstehende Pyrolysat geht aktuell in die Verbrennung.

Das Pyrolysat aus Klärschlamm ist zum aktuellen Stand nicht als Düngemittel zulässig. Insofern reduziert die Pyrolyse das Klärschlammvolumen durch die damit verbundene Trocknung und den partiellen organischen Abbau, stellt aber noch kein Phosphorrückgewinnungsverfahren dar. Demnach muss, soweit der eingesetzte Klärschlamm der Phosphorrückgewinnungspflicht ab 2029 unterliegt, das Material vor oder nach der Pyrolyse einem weiteren Behandlungsschritt unterzogen werden oder eine andere Verwertung gefunden werden, die auch die stoffliche Verwertung des Phosphors sicherstellt. Immissionsschutzrechtlich sind Pyrolyseanlagen als thermische Anlagen zur Abfallbehandlung (Anhang 1 Nr. 8.1 der 4. BImSchV) einzustufen. Zudem sind für Pyrolyseanlagen für Klärschlamm die Anforderungen der 17. BImSchV zu beachten.

7 Phosphorrückgewinnung

7.1 Allgemeines zur Ressource Phosphor

Phosphor ist ein essenzielles Element und für Lebensvorgänge unentbehrlich. Gemäß U.S. Geological Survey beträgt die geschätzte statische Reichweite der erschlossenen Phosphorressourcen etwa 1.000 Jahre (U.S. Geological Survey 2024). Die statische Reichweite der Phosphorreserven, also der derzeit wirtschaftlich abbaubaren Vorkommen, liegt bei etwa 300 Jahren. Rund 75 % des gesamten Phosphorabbaus finden in den fünf Ländern USA, China, Marokko, Tunesien und Russland statt. Die grundsätzliche Phosphatverfügbarkeit ist derzeit tendenziell unkritisch. Problematisch ist dagegen die Qualität der Erze hinsichtlich Schwermetallverunreinigungen und Phosphatgehalt. Der Abbau der Phosphorerze und die Erzaufbereitungsprozesse sind mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden (u. a. Einsatz großer Mengen an Schwefelsäure) (Bertau et al. 2017). Auch das Phosphatvorkommen in Norwegen, das in den letzten Jahren viel Aufmerksamkeit erhielt, ist aufgrund der Lagerstättentiefe und des geringen Phosphorgehalts auf absehbare Zeit nicht wirtschaftlich erschließbar (DPP 2023).

Deutschland muss den benötigten mineralischen Phosphor in vollem Umfang importieren. Die Preise für Phosphatdünger unterliegen starken Schwankungen und korrelieren mit den Phosphatgesteinspreisen. So verdoppelte sich der Preis für Rohphosphat im Zuge der Energiekrise 2022 zwischenzeitlich (World Bank 2024). Auf Grund der geopolitisch teils kritischen Lage der Herkunftsländer und der Verunreinigung mit Schwermetallen des Rohphosphates ist eine Nutzung von sekundären Phosphorquellen anzustreben. Die größten Rückgewinnungspotenziale für die Ressource Phosphor sind in den biogenen Reststoffen Abwasser, Klärschlamm und Tiermehl vorhanden.

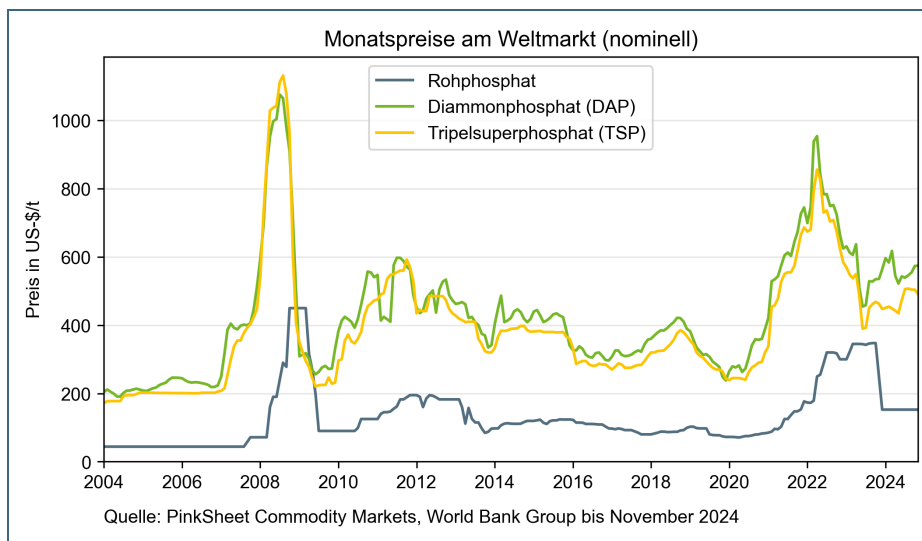


Abb. 11:
Monatspreise für
Rohphosphate und
Düngemittel am Welt-
markt

7.2 Potenziale zur Phosphorrückgewinnung

Grundsätzlich lässt sich Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm, Prozesswässern der Schlammbehandlung sowie Klärschlammmasche zurückgewinnen. Hierzu gibt es eine Reihe technischer Verfahren, die bereits im Anwendungsmaßstab etabliert sind oder kurz davor sind, aber auch viele Entwicklungsansätze, die sich aus technischen oder ökonomischen Gründen bislang nicht etablieren konnten. Derzeit ist ein Trend hin zu Verfahren erkennbar, die auf eine Phosphorrückgewinnung aus den Klärschlammaschen basieren.

Aus Abb. 12 sind die Ergebnisse der Rückmeldungen nach § 3a AbfKlärV zum Phosphorgehalt im Klärschlamm im Jahr 2023 für Bayern dargestellt. Insbesondere bei kleinen Kläranlagen weist ein

wesentlicher Anteil der Anlagen einen Phosphorgehalt sicher unter 20 g P/kg TM auf, der Phosphorgehalt nimmt mit der Anlagengröße tendenziell zu. Mengenbezogen weisen über 90 % des Klärschlammes einen Phosphorgehalt über 20 g P/kg TM auf.

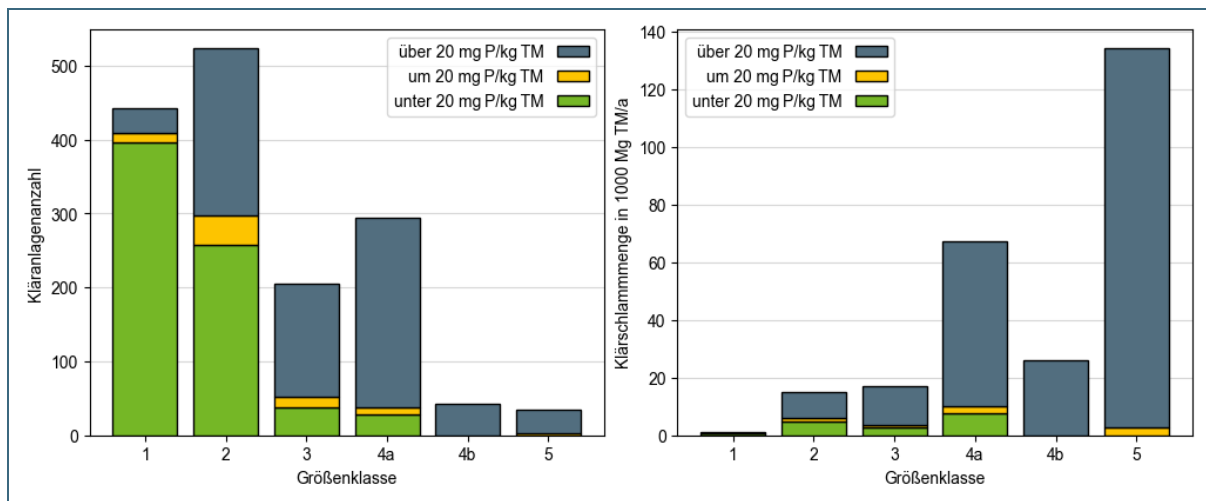


Abb. 12: Phosphorgehalte im Klärschlamm, der der Klärschlammverordnung unterliegt.

Das theoretische Phosphorpotenzial im bayerischen kommunalen Klärschlamm liegt bei rund 8.600 t P/Jahr (siehe auch Abb. 13). Als Vergleich dazu beträgt der jährliche Mineraldüngereinsatz in Bayern rund 16.000 t P/Jahr. Wenn aus allen bayerischen Klärschlämmen mit um oder über 20 g P/kg TM Phosphor mit einer Rückgewinnungsquote von 80 % rückgewonnen würde, entspräche dies einer rezyklierten Phosphorfracht von rund 6.900 t P/a. Dieser Anteil ist als rückgewinnbar in Abb. 13 gekennzeichnet und entspricht rund 43 % jährlichen Phosphorbedarfs für Mineraldünger in Bayern. Auch Tiermehl der Kategorie 1 birgt noch ein ungenutztes Rückgewinnungspotenzial von rund 1.100 t P/a.

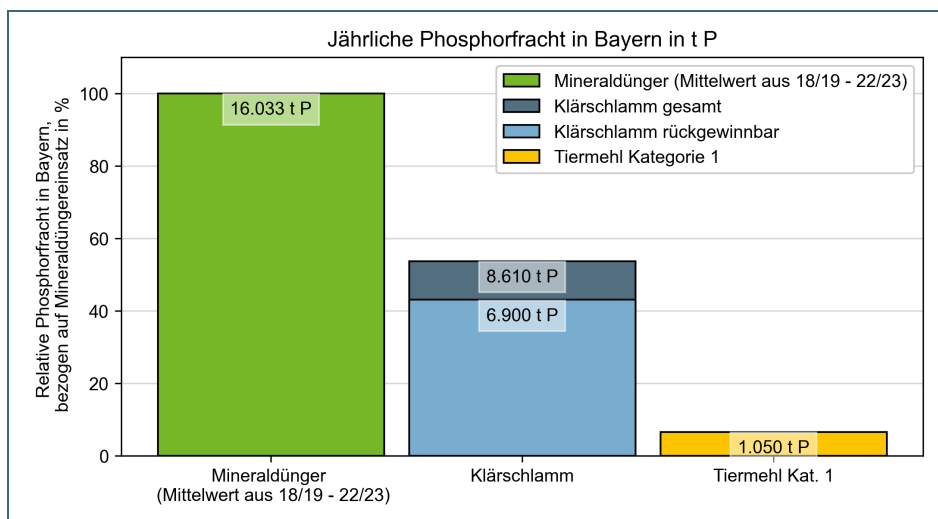


Abb. 13: Phosphorströme in Klärschlamm und Tiermehl im Vergleich zum Mineraldünger

7.3 Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor

Vorab eine Ausführung zum geltenden Recht: Die Klärschlammverordnung bezieht sich nur auf Klärschlamm, also einen „Abfall aus der abgeschlossenen Behandlung von Abwasser in Abwasserbehandlungsanlagen, der aus Wasser sowie aus organischen und mineralischen Stoffen, ausgenommen Rechen-, Sieb- und Sandfangrückständen, besteht“ (AbfKlärV 2017). Sie gilt daher nicht für die Abwasserbehandlung selbst, also auch nicht für P-Rückgewinnungsmaßnahmen im Rahmen der Abwasserbehandlung. Wenn nach einer P-Rückgewinnung in der Abwasserbehandlungsanlage der P-Gehalt

nicht unter 20 g/kg TM im erzeugten Klärschlamm vorliegen, ist dennoch eine weitere P-Rückgewinnung erforderlich.

Das BMBF fördert im Rahmen von RePhoR (Regionales Phosphor-Recycling) sieben Verbundprojekte und ein Transfer- und Vernetzungsvorhaben (<https://www.bmbf-rephor.de/>). Jedes Verbundprojekt besteht aus mehreren Teilprojekten und Arbeitspaketen mit Verbundpartnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Praxis. Das Verbundvorhaben hat das übergeordnete Ziel, „durch innovative wirtschaftliche Lösungen zum regionalen P-Recycling einen Beitrag zur Umsetzung der neuen Klärschlammverordnung zu leisten“. Bayern hat zuvor zusammen mit anderen Bundesländern und dem BMU eine Phosphor-Recycling-Strategie für Deutschland in die Wege geleitet. Ergänzend hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit eine „Initialstudie Phosphorstrategie für Bayern“ im Jahr 2011 in Auftrag gegeben.

Im Folgenden wird eine Auswahl an Verfahren zur Rückgewinnung des Phosphors aus Prozesswässern, Klärschlamm und Klärschlammaschen kurz beschrieben. Die Informationen beruhen im Wesentlichen auf Angaben der deutschen Phosphor-Plattform (DPP; www.deutsche-phosphor-plattform.de), Angaben aus der Reihe „Verwertung von Klärschlamm“ (Holm et al. 2019) und einer Studie im Auftrag des LfU, die speziell die Rückgewinnungsverfahren auf der Kläranlage behandelt (Schaum et al. (2020), verfügbar unter: <https://www.unibw.de/wasserwesen/swa/aktuelle-nachrichten/abschlussbericht-phosphorrueckgewinnung>).

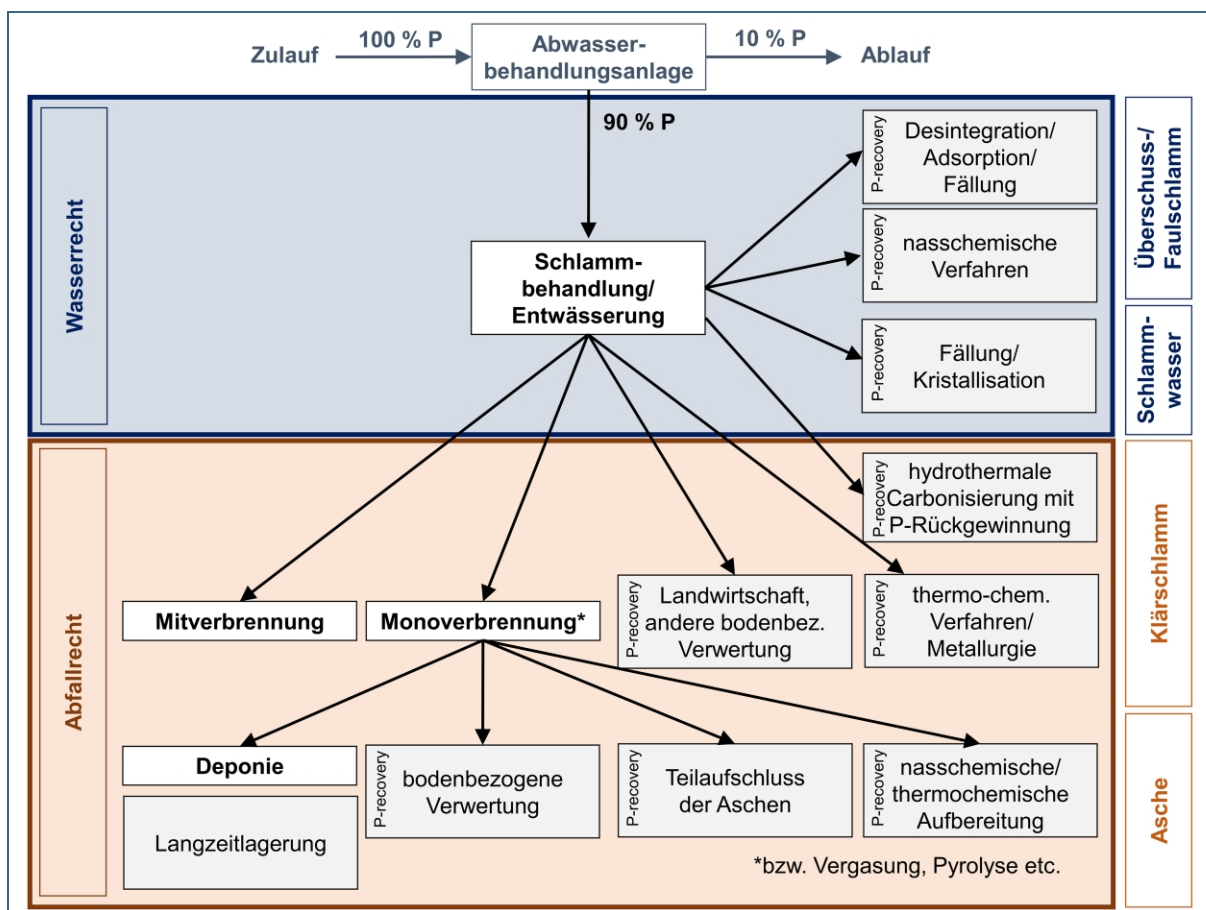


Abb. 14: Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung im Bereich der Abwasserreinigung, aus Klärschlamm und Klärschlammasche

In Abbildung 14 ist eine schematische Abbildung gegeben, an welchen Stoffströmen die Rückgewinnung ansetzen kann und welche technischen Ansätze zur Verfügung stehen. Die Rückgewinnungsquote hängt stark von der Phase ab, an der die Rückgewinnung ansetzt. Die voraussichtlichen Recyclingquoten liegen aus dem Abwasser oder Schlammwasser bei maximal 30 %, aus dem Klärschlamm bei 60 bis 90 % und aus Aschen um die 90 %, jeweils bezogen auf die Zulaufkraft im Abwasser (LAGA AG Phosphor 2015).

Es werden im Folgenden nur Verfahren aufgeführt, für die bei der Erstellung der Planungshilfe bereits eine gewisse Praxis- oder Planungsreife belegt wurde. Die Aufstellung hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

7.4 Rückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung

Wie oben dargestellt ist eine Rückgewinnung des Phosphors im Bereich der Abwasserbehandlung im Faulschlamm (vor der Entwässerung) oder im Schlammwasser möglich. Prinzipiell ist auch eine Rückgewinnung aus dem Überschussschlamm denkbar. Den bekannten Verfahren ist gemein, dass Phosphat in gelöster Form als ortho-Phosphat vorliegen muss, das im Anschluss auskristallisiert, als Salz ausgefällt oder an einem Trägermaterial adsorbiert wird.

Der Anteil des gelösten Phosphats im für die Rückgewinnung relevanten Medium im Vorfeld hängt stark von der Abwassertechnik der Anlage ab, insbesondere von der Art und dem Einsatzort der Phosphor-Eliminierung. Wenn, wie in Bayern üblich, Phosphate durch Eisen- oder Aluminiumsalze chemisch gefällt werden, ist der Anteil gelösten Phosphats im Faulschlamm oder im Zentrat der Faulschlammentwässerung gering. Wenn dagegen auf der Anlage eine vermehrte biologische Phosphoreliminierung betrieben wird (Bio-P), liegt eine größere Fraktion des Phosphats nach einer Faulung gelöst vor.

Um den Anteil des gelösten Phosphats zu steigern, stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, etwa eine biologische, thermische oder thermisch-chemische Hydrolyse des Klärschlammes oder die chemische Rücklösung gebundenen Phosphats durch pH-Absenkung.

Das gelöste Phosphat wird im nächsten Schritt aus der Flüssigphase zu einem abtrennbaren Feststoff überführt. Der am meisten verbreitete Ansatz zielt auf die Ausfällung von Magnesiumammoniumphosphat (MAP), auch als Struvit bezeichnet, ab. Hierzu wird ein Magnesiumsalz zugesetzt und der pH-Wert angehoben, wobei die geringste Löslichkeit für Struvit im pH-Bereich von 8,5 – 9 liegt. Die pH-Anhebung erfolgt durch Austreiben von CO₂ mittels Luftstrippung oder Vakuumdegasung, durch Dosierung einer Lauge wie Natronlauge oder durch eine Kombination der Verfahren. Das ausgefällte Struvit wird aus dem Reaktor abgezogen, von der wässrigen Phase abgetrennt und stellt das Rezyklat dar. Alternative Rezyklate sind Calciumphosphat oder P-angereichertes Calcium-Silikat-Hydrat (CSH).

Ohne Maßnahmen zur verstärkten Rücklösung des Phosphats sind diese Verfahren allenfalls geeignet, Schlämme mit niedrigen Phosphorgehalten derart zu behandeln, dass der Phosphorgehalt auf unter 20 g/kg TM gesenkt wird.

Die Abtrennung von Phosphat muss jedoch nicht durch die Rückgewinnungspflicht motiviert sein, sondern bringt unter Umständen Vorteile für den Kläranlagenbetrieb mit sich. So kann damit Ablagerungen in Aggregaten und Leitungen entgegengewirkt oder eine verbesserte mechanische Entwässerbarkeit des Schlammes erreicht werden. Insbesondere die Ablagerung von Struvit ist ein auf Kläranlagen häufig auftretendes Problem. Die gezielte Ausfällung von Struvit oder eine anderweitige Phosphatabtrennung kann diesem Problem entgegenwirken. (Schaum et al. 2020)

7.4.1 Struvit-Verfahren

Beim **AirPrex**-Verfahren wird der Faulschlamm einem Reaktorsystem zugeführt und einer Luftstrippung unterzogen. Durch das Ausgasen von Kohlendioxid steigt der pH-Wert an, und nach Zugabe von Magnesiumchlorid fällt Phosphor als Struvit aus. Das Struvit wird abzentrifugiert und für Düngezwecke verwendet. Dieses Verfahren kann eine sinnvolle Ergänzung der vermehrten biologischen Phosphorelimination auf Kläranlagen darstellen, etwa um die P-Rückbelastung aus dem Schlammwasser zu verringern. Ursprünglich wurde das Verfahren von den Berliner Wasserbetrieben entwickelt, um Inkrustationsprobleme durch spontane Struvit-Bildung bei der Schlammbehandlung zu lösen. Es ist mittlerweile auf diversen Abwasserbehandlungsanlagen (Berlin, Mönchengladbach, Göppingen usw.) großtechnisch installiert.

Beim **Ostara Pearl**-Verfahren erfolgt die Abscheidung von Struvit in Kristallisationstürmen, in denen Filtratwasser aus der Faulschlammmentwässerung mit Natronlauge und Magnesiumchlorid versetzt wird. Das ausgefällte Struvit wird nach Trocknung als Dünger mit der Handelsbezeichnung Crystal Green® vermarktet. Die Fa. OSTARA betreibt in Nordamerika, den Niederlanden und Spanien derartige großtechnische Kristallisationsanlagen (Schaum et al. 2020).

Beim **Peco**-Verfahren wird aus dem Überschussschlamm Phosphor in einer biologischen Behandlungsstufe in die wässrige Phase überführt. Bei dem Verfahren muss Phosphor ausschließlich mittels Bio-P eliminiert worden sein. Aus der wässrigen Phase wird durch Zugabe von Magnesium und einer pH-Anpassung Struvit ausgefällt.

Nach dem **PhosForce**-Verfahren der Firma Veolia GmbH wird der Klärschlamm vor der Faulung biologisch hydrolysiert, die dabei gebildeten organischen Säuren, senken den pH-Wert und sorgen gemeinsam mit den anaeroben Bedingungen für eine Phosphatlösung. Der hydrolysierte Schlamm wird entwässert und das Filtrat in einem Kristallisationsreaktor als Struvit oder Calciumphosphat ausgefällt. Eine Referenzanlage im industriellen Maßstab wurde auf der Kläranlage in Schönebeck (Elbe) getestet (Lodwig 2020).

Bei Verfahren mit Rückgewinnung aus dem Faulschlamm besteht die Gefahr, dass auch ungewollte Bestandteile das Kristallisationsprodukt verunreinigen. Eine etwaige Kontamination mit Organik oder Mikroplastik aus dem Klärschlamm erschwert die Verwertung des Produkts. Daher wird in einer Variation der Verfahren das Struvit nicht abgetrennt, sondern verbleibt als Festbestandteil im Faulschlamm. Somit werden die anlagentechnischen Vorteile der Struvit-Fällung ausgenutzt, jedoch auf ein Phosphorrückgewinnung verzichtet.

Die Beispiele mit Struvit-Fällung aus dem Zentrat oder Filtrat erzeugen im Regelfall ein reineres Fällungsprodukt. Auf Aspekte der Verwertbarkeit als Düngemittel wird in Abschnitt 7.7 eingegangen.

7.4.2 CSH-Verfahren

Ein weiterer Ansatz zur Phosphorrückgewinnung aus dem Zentrat basiert auf der Kristallisation von Phosphaten auf Calcium-Silicat-Hydrat (CSH). Dieser Ansatz wird beispielsweise beim **P-RoC**-Verfahren (Phosphorus Recovery from Waste Water by Crystallization of Calcium Phosphate Compounds) verfolgt, bei dem die Kristallisation innerhalb eines Rührreaktors stattfindet, in dem das zudosierte CSH-Material mit dem Abwasserstrom durchmischt wird und auf dessen Oberfläche Calciumphosphat abgeschieden werden soll.

Auf der Kläranlage Großostheim wurde das P-RoC-Verfahren innerhalb eines Demonstrationsprojekts von 2017 bis 2020 innerhalb eines Forschungsprojekts untersucht. Das erzeugte Produkt erreichte allerdings nicht den gemäß der DüMV notwendigen Mindestgehalt an Phosphat (KIT 2021).

Am Standort Neuburg an der Donau wird eine Pilotanlage mit CSH-Verfahren betrieben. Dabei durchströmt das Faulschlammzentrat vertikal ein CSH-Festbett, das intervallmäßig durch Luftindüsung verwirbelt wird. Das feuchte CSH-Produkt wird über eine Schnecke ausgetragen und anschließend auf einem Bandrockner behandelt.

Beim entstehenden Produkt müssen aus düngerechtlicher Sicht noch die geforderten Löslichkeiten und Mindestnährstoffgehalte erreicht werden. Inwiefern damit die Phosphorrückgewinnungspflicht erfüllt werden kann, ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht feststellbar.

7.4.3 Hydrothermale Carbonisierung mit gekoppelter Phosphorrückgewinnung

Die hydrothermale Carbonisierung (HTC) ist eine thermochemische Behandlung des entwässerten Klärschlammes bei 180 – 250 °C unter Druck. Dabei entsteht eine Carbonisatsuspension und ein Prozessgas, das vor allem aus CO₂ und Wasser besteht. Aus Sicht der Klärschlammbehandlung liegt der Hauptvorteil in der gesteigerten mechanischen Entwässerbarkeit der Carbonisatsuspension im Vergleich zum Klärschlamm.

Zur Phosphorrückgewinnung wird durch Säureeinsatz Phosphat zu 70 – 90 % rückgelöst. Nach einer Phasenseparation wird gelöstes Phosphat kristallisiert und abgetrennt. Je nach Zielprodukt entweder durch Zugabe von Base und Magnesiumsalzen Struvit ausgefällt oder Calcium-Silikat-Hydrat als Kristallisationskeim zugegeben. Das P-arme Karbonisat kann einer Mitverbrennung zugeführt werden. Eine Pilotanlage für dieses Verfahren stand in Duisburg und zuletzt am Standort Pau-Lescar in Frankreich, wobei dort nur die HTC, aber keine Phosphorrückgewinnung betrieben wurde (Leise 2025).

Das bei diesem Prozess anfallende Prozesswasser nach der Filtration bedarf einer gesonderten Behandlung. Je Tonne entwässertem Klärschlamm, der der HTC zugeführt wird, fallen etwa 500 – 700 kg Prozesswasser an⁷. Dieses Prozesswasser bringt eine organische Fracht in der Größenordnung von 30.000 – 90.000 mg/l, angegeben als chemischer Sauerstoffbedarf, mit. Die Ammoniumkonzentrationen im Prozesswasser aus Laborversuchen bewegen sich im Bereich von rund 1.000 – 5.000 mg/l. (Waldmüller 2023)

7.5 Rückgewinnung innerhalb des Abfallrechts

Die Phosphorrückgewinnungsverfahren nach der Kläranlage im Zuge der Klärschlammverwertung fokussieren sich auf Kombinationen mit der thermischen Verwertung, in erster Linie der Verbrennung.

Die wesentliche Maßgabe hierfür ist eine Rückgewinnungsquote für Phosphor von mindestens 80 % aus der Asche oder dem thermischen Behandlungsrückstand. Die entsprechenden Verfahren aus Klärschlammaschen können grob folgenden Kategorien zugeordnet werden:

- physikalisch-chemischer Teilaufschluss
- thermochemische Aschekonditionierung
- nasschemischer saurer Ascheaufschluss mit anschließender Aufreinigung zur Phosphorsäure oder zu anderen Phosphaten

Unabhängig vom Rückgewinnungsverfahren ist ein hoher Phosphoranteil in der Asche für jedes Verfahren vorteilhaft, weil entweder auch der Phosphoranteil im Rezyklat höher ist oder der spezifische Aufwand an Betriebsmitteln für das Verfahren abnimmt.

⁷ Überschlägige Rechnung bei einem Trockensubstanzgehalt des Ausgangsmaterials von 25 % TR, einer Feststoffausbeute von 75 – 90 %, einer Gasproduktion von 5 % aus dem Feststoff und einer Entwässerung des Karbonisats auf 50 – 65 % TR.

Seit 01. Juni 2020 müssen nach deutscher Düngemittelverordnung „Phosphatdünger aus der Verbrennung von Klärschlamm“ eine Wasserlöslichkeit aufweisen. Die Phosphate in Klärschlammaschen sind jedoch wasserunlöslich. Unter dieser Maßgabe ist nach deutschem Recht eine landwirtschaftliche Direktverwertung von Klärschlammaschen ohne vorherige Mischung oder anderweitige Verarbeitung nicht möglich.

7.5.1 Physikalisch-chemischer Teilaufschluss

Um auf kurzem Wege die Löslichkeit des Phosphats in der Asche zu verbessern und einen marktfähigen Dünger zu erzeugen, wird der Ansatz eines Teilaufschlusses durch Säurezugabe mit anschließender Konfektionierung verfolgt.

Diese Verfahren sind nach deutschem Düngemittelrecht auf Aschen aus Klärschlämmen beschränkt, die den Anforderungen der Klärschlammverordnung für die bodenbezogene Verwertung genügen. Eine Verwertung als EU-Düngeprodukt ist bei entsprechenden Löslichkeiten denkbar. Jedoch sollte auch hier auf die Verwendung stark schwermetallbelasteter Aschen verzichtet werden: In der EU-Düngeprodukteverordnung sind für anorganische Makronährstoff-Düngemittel Grenzwerte für Schwermetallgehalte festgelegt.

Wird das erzeugte Produkt nach deutschem Düngemittelrecht in Verkehr gebracht, müssen bereits die eingesetzten Klärschlämme den Anforderungen der Klärschlammverordnung für die bodenbezogene Verwertung genügen. Bei einer Verwertung als EU-Düngeprodukt werden entsprechende düngerechtliche Vorgaben erst an die erzeugten Aschen gestellt. Jedoch sollte auch hier auf die Verwendung stark schwermetallbelasteter Klärschlämme verzichtet werden: In der EU-Düngeprodukteverordnung sind für anorganische Makronährstoff-Düngemittel Grenzwerte für Schwermetallgehalte festgelegt. Nicht alle Schwermetalle können im Verbrennungsprozess ausreichend abgereichert werden.

Unter der Verfahrensbezeichnung **Phos4Green** betreibt die Firma Seraplant eine solche Anlage im industriellen Maßstab am Standort Haldensleben in Sachsen-Anhalt. Bei dem Verfahren wird Klärschlammmasche in Phosphorsäure suspergiert und anschließend in einem Granuliertrockner getrocknet und in Granulatform gebracht (Leidolph et al. 2017). Durch Zugabe weiterer Nährstoffe, etwa Kalium, ist auch die Herstellung von Mehrnährstoffdüngern möglich. Die Trocknungswärme wird durch Erdgasbrenner zur Verfügung gestellt. Die Betreiberfirma meldete 2023 aufgrund der enormen Preissteigerung für die Betriebsmittel (Erdgas, Phosphorsäure) Insolvenz an, ging aber nach einer Konsolidierung 2025 wieder in Betrieb.

In ähnlicher Weise arbeitet das **Pontes-Pabuli**-Verfahren, bei dem für den sauren Teilaufschluss jedoch Salpetersäure verwendet wird und in einer Suspension stattfindet. Die Suspension wird einer Phasenseparation unterzogen und die Flüssigphase rezykliert. Der noch feuchte Feststoff wird getrocknet und granuliert. Aufgrund des Einsatzes von Salpetersäure enthält die teilaufgeschlossene Asche Nitrat und damit eine weitere Düngerkomponente. Laut Anbieter sei eine zusätzliche Schwermetallabreicherung aus der rezirkulierten Flüssigphase optional verfügbar, beispielsweise durch sulfidische Fällung (Hager et al. 2020). Die Weiterentwicklung dieses Verfahren ist Teil des RePhoR-Teilprojekts „DreiSATS“.

Die Firma **ICL Fertilizers** stellt in Ludwigshafen Dünger her, indem Rohphosphat mit Phosphorsäure behandelt, mit anderen Nährstoffen granuliert und getrocknet wird. ICL Fertilizers substituiert im Prozess Rohphosphate teilweise durch Klärschlammmasche (oder andere phosphathaltige Abfälle), sodass die Asche Ausgangsstoff eines konventionellen Düngers ist. Klärschlammaschen enthalten gegenüber Rohphosphat mehr Inertmaterial auf und weisen dementsprechend einen geringeren Phosphatgehalt auf.

7.5.2 Thermochemische Aschekonditionierung

Die aktuellen Entwicklungen greifen die Herangehensweise des historischen Rhenania-Verfahrens zur Herstellung eines Phosphatdüngers auf. Bei den aktuellen Verfahren mit thermochemischer Aschekonditionierung wird der Klärschlamm oder die Klärschlammasche mit Additiven versetzt und bei Temperaturen zwischen 800 °C und 1100 °C behandelt. Es erfolgt eine Beimischung der Additive in der Verbrennung oder eine Nachbehandlung der Asche in einer separaten Anlage. Die Additivzugabe dient dazu, die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors zu erhöhen und gegebenenfalls eine Schwermetallabreicherung in der Klärschlammasche zu erzielen. Bei den Additiven handelt es sich um Alkali- oder Erdalkalisalze mit Chlorid, Sulfat oder Carbonat als Gegenion (Schnell 2023; Herzel et al. 2016).

Die Wahl des Additivs beeinflusst maßgeblich die Wirkung und die Anforderungen an den Konversionsprozess. Alkalisalze wie Natrium oder Kalium führen zur Umwandlung von unlöslichem Whitlockit (vereinfacht $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$) zu pflanzenverfügbaren Verbindungen (CaKPO_4 , CaNaPO_4) (Leers et al. 2024; Stermann et al. 2014). Die Zugabe von Calcium oder Magnesium beeinflusst zwar auch die Bindungsform des Phosphats, die entstehenden Mineralphasen sind aber nur mäßig pflanzenverfügbar (Adam et al. 2009). Der Einsatz von Chloriden führt zur Bildung von Schwermetallchloriden wie CdCl_2 , die höhere Flüchtigkeit als die Schwermetalle in elementarer Form besitzen und damit aus der konditionierten Asche ausgetrieben werden können (Adam et al. 2007). Sulfate sind eher kostengünstig, bedürfen aber für eine effektive Wirkung reduktive Bedingungen und höhere Temperaturen, damit sich flüchtige Schwermetallsulfide bilden können (Herzel et al. 2016; Herzel et al. 2022). Carbonate sind zwar auch bei geringeren Temperaturen einsetzbar, aber vergleichsweise teuer, unterstützen die Schwermetallentfrachtung nicht und tragen durch das freiwerdende CO_2 zur Klimaerwärmung bei, wenn das Carbonat aus Kalk oder anderen primären Quellen stammt (Stemann et al. 2015).

Bei dem **AshDec**-Verfahren wird die angefeuchtete Klärschlammasche zunächst mit Alkalisalzen gemischt und zu Pellets verarbeitet. Die Pellets werden anschließend für 20 – 30 Minuten in einem Drehrohrföfen bei etwa 1.000 °C behandelt. Dabei gehen die Schwermetalle als Schwermetallchloride in die Gasphase über und werden in der Abgasreinigung abgeschieden. Hierzu ist ein Reduktionsmittel notwendig, beispielsweise die Beimischung von Klärschlamm. Die Phosphate und andere Nährstoffe verbleiben in den Pellets und werden in Verbindungen überführt, die für die Herstellung von Düngemitteln geeignet sind. Die Aktivitäten der ASH DEC Umwelt KG werden von der Firma Metso weitergeführt. (Herzel et al. 2018)

Am Standort der Klärschlammverbrennungsanlage in Altenstadt (siehe Seite 31) wird aktuell im Zuge des RePhoR-Verbundprojekts „P-Rhenania“ eine Variante des Verfahrens getestet. Anstatt einer nachgeschalteten Konditionierung der Asche werden Alkalisalze dem entwässerten Klärschlamm vor der Trocknung beigemischt und anschließend der Rostfeuerung zugeführt. In der Rostfeuerung wird die Umwandlung von unlöslichen Phosphaten in alkalihaltige und pflanzenverfügbare Phosphate, wie CaNaPO_4 , begünstigt. Die notwendige Verweilzeit für diese Umwandlung wird durch die Rostfeuerung gewährleistet. (Leers et al. 2024)

Beim **EuPhoRe**-Verfahren wird die Monoverbrennung mit der Phosphorrückgewinnung kombiniert und eine konditionierte Klärschlammasche für die Düngemittelerzeugung bereitgestellt. Dazu wird eine zweistufige Verbrennung mit einer oxidativen und einer reduktiven Zone im Drehrohrföfen bei Temperaturen von etwa 1.000 °C betrieben. Als Additive kommen chlorid- oder sulfathaltige Komponenten zum Einsatz, weswegen die reduktive Zone des Drehrohrföfens erforderlich ist. Eine Pilotanlage im industriellen Maßstab befindet sich in Mannheim, die Anlage hat eine Klärschlammkapazität von etwa 35.000 t TM/a (MVV Umwelt Asset GmbH 2023; Boeckh 2024). Die Anlage nutzt als Verbrennungsluft das Abgas der angrenzenden Müllverbrennung, auch das Abgas der EuPhoRe-Anlage wird über Rauchgasreinigung des Müllheizkraftwerks geführt.

In einer Bewertung des Schweizer BAFU wird auf die schlechte Pflanzenverfügbarkeit und Löslichkeit des Produkts des EuPhoRe-Verfahrens hingewiesen (Spörri et al. 2021). Gegebenenfalls wird dieser Schwierigkeit durch Anpassung der Additive, etwa Natrium- und Kaliumsalze anstatt Magnesiumsalzen, entgegengewirkt.

Ein weiterer Ansatz zur thermischen Aschekonditionierung stellt das **P-Xtract**-Verfahren der Firma Wehrle dar. Ähnlich wie beim EuPhoRe-Verfahren werden der Klärschlammverbrennung Additive zugegeben, um die Pflanzenverfügbarkeit und Löslichkeit des Phosphors in der Asche zu erzeugen. Die Verbrennung ist als Wirbelschicht ausgeführt, aus Korrosionsgründen ist ein Einsatz von chlorhaltigen Additiven ausgeschlossen. Stattdessen soll eine Schwermetallentfrachtung der Asche erreicht werden, indem als Besonderheit ein Heißgaszyklon zwischen Brennraum und Ofen geschaltet ist. So kondensieren flüchtige Schwermetalle nicht in der Zyklonasche, sondern landen in der nachfolgenden Filterasche. Durch die Luftstufung in der Verbrennung liegen im Wirbelbett unterstöchiometrische Verhältnisse vor. Als zusätzliche Maßnahme zur Steigerung der Düngewirksamkeit wird die Zyklonasche mit Säure oder anderen Zuschlagstoffen behandelt (vgl. Abschnitt zur physikalisch-chemischen Aschebehandlung).

Dieses Verfahren ist in die Anlagentechnik der neuen Klärschlammverbrennung in Mällersdorf verwirklicht. Auch die aktuell im Bau befindliche Monoverbrennung des Abwasserzweckverbands „Staufener Bucht“ in Baden-Württemberg folgt diesem Anlagenkonzept (Leise 2024).

7.5.3 Nasschemischer Ascheaufschluss und Aufbereitung

Im Wesentlichen beinhalten die nasschemischen Rückgewinnungsverfahren aus der Asche folgende Schritte:

- Lösung der Phosphate in einer Mineralsäure
- Abtrennung des ungelösten Feststoffs
- Aufreinigung der phosphathaltigen Lösung, insbesondere Entfernung von mehrwertigen Metallen
- Aufkonzentration der Phosphorsäure oder Fällung des Phosphats

Bei den Verfahren fallen dementsprechend neben einem Rezyklat (z. B. Phosphorsäure oder Calciumphosphat) ein silikathaltiger Feststoff und ein oder mehrere weitere Nebenprodukte an. Die Nebenprodukte sind teilweise wieder als Fällmittel (Eisenchlorid, Aluminiumchlorid) für die Kläranlagen einsetzbar. In der folgenden, nicht abschließenden Darstellung werden verschiedene aussichtsreiche Verfahren erläutert.

Die Klärschlammasche wird beim **TetraPhos**-Verfahren der Firma Remondis in Phosphorsäure gelöst, wobei die Phosphorsäure mit dem Phosphoranteil der Asche angereichert wird. Die angereicherte Säure wird in verschiedenen Selektionsstufen aufbereitet. So lassen sich Phosphorsäure für die Herstellung von Phosphaten (u. a. Düngemitteln), Gips für die Baustoffindustrie, aber auch Eisen-Aluminiumsalze gewinnen. Dieses Verfahren wird von der Remondis GmbH vorangetrieben. Eine erste Anlage in Hamburg im industriellen Maßstab befindet sich aktuell in der mehrjährigen Optimierungs- und Pilotierungsphase. Eine Volllastung der Anlage ist nicht vor 2026 zu erwarten.

Ash2Phos ist ein weiteres nasschemisches Verfahren. Im ersten Schritt werden die Aschen in Salzsäure gelöst und die ungelösten Reststoffe abgetrennt. Rückgewinnbare Elemente wie Phosphor, Eisen und Aluminium werden in weiteren Prozessschritten zu Zwischenprodukten verarbeitet. Diese können je nach Bedarf zu unterschiedlichen Endprodukten verarbeitet werden. Der Technologieträger, die Firma EasyMining, entwickelte das Verfahren unter anderem an einer Pilotanlage in Helsingborg, Schweden. Der Bau einer ersten großtechnischen Anlage wird am Chemiestandort in Schkopau (Sachsen-Anhalt) mit einer Kapazität von 30.000 t/a Asche forciert, die 2027 in Betrieb gehen soll.

Das Ziel ist, nach erfolgreicher Inbetriebnahme die Anlagenkapazität in Schkopau durch eine zweite Anlagenlinie zu verdoppeln und weitere Standorte in Deutschland aufzubauen, um verschiedene Regionen zu bedienen.

Laut der PARFORCE Engineering & Consulting GmbH können mit der **PARFORCE**-Technologie verschiedene phosphorhaltige Rest- und Wertstoffe zu Phosphorsäure verarbeitet werden. In einem nasschemischen Verfahren wird mittels Salz- oder Salpetersäure der phosphathaltige Rohstoff aufgeschlossen. Nach der Fest-Flüssig-Trennung wird die Rohphosphorsäure durch Elektrodialyse von den übrigen gelösten Verunreinigungen (Ca, Mg, Cl usw.) abgetrennt. Die entstehende Rohphosphorsäure (15 – 20 Gew.-%) wird anschließend konzentriert. In einer Pilotanlage in Bottrop mit einer Kapazität von 1.000 t Asche/a wird das Verfahren aktuell optimiert. Der zweijährige Optimierungsbetrieb wurde durch das Verbundvorhaben RePhoR-Projekts des BMBF im Teilprojekt Amphore gefördert. Der Betrieb der Pilotanlage wurde Mitte 2025 an den Kläranlagenbetreiber übergeben.

7.6 Perspektiven der Phosphorrückgewinnung

Viele Verfahren zur Phosphorrückgewinnung befinden sich noch im Entwicklungs- und Pilotierungsstadium. Ausnahmen hiervon bilden die Struvit-basierten Fällungsverfahren oder das Phos4Green-Verfahren. Bei den meisten übrigen Verfahren fehlen noch die Erfahrungen im großtechnischen Betrieb. Unklar ist derzeit die Nachfrage nach und die Akzeptanz für verschiedene Phosphorrezyklate.

Gerade die Rückgewinnungspflicht ab 2029 wird die Entwicklung der entsprechenden Verfahren weiter vorantreiben. Auch die geopolitisch unsichere Lage der Versorgerländer und die steigende Verunreinigung mit Schwermetallen von Rohphosphaten unterstützt diese Entwicklung (Bertau et al. 2017). Dadurch ist eine zunehmende Wirtschaftlichkeit der Phosphorrückgewinnung zu erwarten.

Die Rückgewinnung aus Klärschlammaschen zeigt hier das höchste Potenzial, da hohe Rückgewinnungsraten und eine hohe Produktqualität bei akzeptablen Produktionskosten möglich sind (Spörri et al. 2021).

Die Möglichkeiten und Grenzen für die Rückgewinnungsverfahren auf der Kläranlage sind im Abschlussbericht „Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung“ zusammengefasst, es finden sich dort auch Empfehlungen für die Praxis (Schaum et al. 2020). Die Phosphorrückgewinnung aus Schlammwässern auf Kläranlagen durch Struvit-Fällung kann mit relativ geringem technischem Aufwand umgesetzt werden, wenn auf der Kläranlage eine vermehrte biologische Phosphoreliminierung stattfindet. Bei ungünstigen Bedingungen, etwa höheren Phosphorgehalten, sind die Verfahren jedoch nicht in der Lage, die Maßgaben Klärschlammverordnung zur Phosphorrückgewinnung zu erfüllen.

Struvit, als Rezyklat mit dem höchsten Entwicklungsstatus, wurde anhand Modellregion in Niedersachsen die Akzeptanz bei Landwirten qualitativ betrachtet. Eine Vermarktung von Struvit als Düngemittel erscheint machbar, sowohl in der konventionellen als auch der ökologischen Landwirtschaft (Pillen et al. 2023). Der Einsatz von Struvit als Düngemittel nach EU-Düngemittelverordnung ist möglich. Zudem ist Struvit innerhalb der ökologischen Landwirtschaft einsetzbar. (Pillen et al. 2023)

Auf Grund der aktuellen Stickstoffübersorgung in weiten Teilen Deutschlands bieten sich Verfahren zur Behandlung von Klärschlammaschen an. Die Rückgewinnungspotenziale liegen um 90 %, bezogen auf den im Abwasserzulauf enthaltenen Phosphor (LAGA AG Phosphor 2015), wobei Stickstoffe bei der Verbrennung in die Gasphase überführt werden. Endprodukte sind phosphathaltige Aschen bzw. Düngemittel oder Phosphorsäuren, die als Ausgangsprodukte für Dünger dienen (DPP 2024).

Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken oder Müllheizkraftwerken ist eine nachträgliche Rückgewinnung des Phosphors nicht mehr umsetzbar. Für Klärschlämme mit geringen

Phosphorgehalten wird die Mitverbrennung voraussichtlich den Hauptentsorgungsweg darstellen, insbesondere da nur noch diese P-armen Schlämme für die Mitverbrennung zur Verfügung stehen.

7.7 Verwertbarkeit der Rezyklate

Die Hauptverwendung von fossilen Phosphaten erfolgt in Düngemitteln, dies wird auch der Haupteinsatzzweck für Rezyklate aus der Abwassereinigung sein. Die Rezyklate aus der Phosphorrückgewinnung unterscheiden sich in ihrer Verwertbarkeit signifikant. Die Absatzmöglichkeiten und -preise werden im Wesentlichen durch drei Hauptaspekte festgelegt (Pillen et al. 2023):

- der konkurrierende konventionelle P-Düngemarkt und damit externe Einflüsse und Krisen (beispielsweise der Ukrainekrieg),
- Rahmenbedingungen des Düngemittelrechts im deutschen und europäischen Kontext und
- praktische Fragestellungen der Düngemittelherstellung und der Landwirtschaft (Produktionskapazitäten, Verfügbarkeit von Wirtschaftsdüngern als Phosphorquelle, einsetzbare Ausbringtechnik).

Als Vertriebswege stehen einerseits der Direktvertrieb im regionalen Umfeld und andererseits die Vermarktung über den Düngemittelvertrieb zur Verfügung. Beim Direktvertrieb besteht die Möglichkeit, regionale Nährstoffkreisläufe zu schließen und durch den Wegfall eines Zwischenhändlers ist möglicherweise ein besserer Preis erzielbar. Dazu muss aber der Kläranlagenbetreiber oder der Betreiber einer Monoverbrennungsanlage beziehungsweise Phosphorrückgewinnungsanlage als Düngemittellieferant auftreten. Damit verbunden sind die Aufgaben wie Qualitätssicherung, Vermarktung, Verpackung und Logistik. Die Abgabe an die Düngemittelindustrie erlaubt die Nutzung etablierter Vertriebswege und erleichtert damit den Markteintritt für das Rezyklat. Damit werden auch bestehende Strukturen der Qualitätskontrolle genutzt und Düngemittelhersteller sind mit den landwirtschaftlichen Fragestellungen, wie etwas Ausbringtechnik, Dosierung, Ausbringzeit oder Lagerung vertraut. (Pillen et al. 2023)

Im Folgenden werden die Phosphatgehalte als P_2O_5 angegeben, dies ist die für Düngemittel übliche Angabe. Der Umrechnungsfaktor von P auf P_2O_5 beträgt 2,29. Um die Nährstoffgehalte einordnen zu können, seien hier die üblichen Phosphatgehalte dreier konventioneller P-Dünger genannt: Diammonphosphat: 46 % P_2O_5 , Doppelsuperphosphat: 35 % P_2O_5 , Tripelsuperphosphat: 46 % P_2O_5 .

Das am weitesten etablierte Rezyklat **Struvit** kann nach EU-Düngeprodukteverordnung in den Verkehr gebracht werden und ist darüber hinaus auch für den Ökolandbau zugelassen. Mit 25 – 30 % P_2O_5 weist es einen für Phosphorrezyklate hohen Nährstoffgehalt auf und bringt mit Magnesium und Ammonium zwei weitere Nährstoffe mit (Jacobi et al. 2022). Abgesehen von möglichen Verunreinigungen enthält das Material nur düngerelevante Komponenten. Bei entsprechender Konfektionierung ist eine Ausbringung mit bekannter Landmaschinentechnik, etwa Kalkstreuern, möglich. Struvit ist nicht wasserlöslich, was in der Anwendung sowohl als Vor- als auch als Nachteil wahrgenommen werden kann: Die Pflanzenverfügbarkeit scheint vergleichbar mit konventionellen P-Düngern wie Diammonphosphat zu sein (Jacobi et al. 2022; Urbatzka et al. 2023).

Als alternatives Fällungsprodukt direkt auf der Kläranlage steht P-angereichertes **CSH** im Fokus der Entwicklungen. Das Produkt weist durch die bestehende Calcium-Silikat-Matrix nach der P-Anreicherung noch immer recht geringe P-Gehalte auf. Innerhalb des Forschungsprojekts P-RoC wurde der Mindestgehalt nach DüMV von 10 % P_2O_5 nicht erreicht (KIT 2021). Inwiefern das Material als anderes Düngemittel als ein Phosphatdünger in Verkehr gebracht werden kann, kann an dieser Stelle nicht geklärt werden. Möglicherweise besteht die Option, das Material zusammen mit weiteren Ausgangsstoffen zu einem Düngemittel zu verarbeiten.

Die Konditionierung der **physikalisch-chemisch behandelten Asche** bietet den Vorteil, dass bei- nahe der gesamte Phosphor in das Rezyklat übergeht, einzig Phosphor in der Filterasche geht bei dieser Behandlung verloren. Gleichzeitig bleiben aber schwerflüchtige Schwermetalle, wie Nickel oder Blei, im Rezyklat. Unter diesem Aspekt ist das Verfahren auf die Verwendung auf Klärschlämme mit geringen Schwermetallgehalten begrenzt. Der Phosphorgehalt korreliert mit den P-Gehalten der ver- werteten Asche. Gemäß eines bundesweiten Aschemonitorings liegt der Phosphatgehalt in Klär- schlammaschen im Mittel bei 16,7 % als P_2O_5 (Adam 2014). Damit werden die Mindestgehalte für reine P-Dünger nach deutschen und EU-Düngerecht von 10 % P_2O_5 bzw. 12 % P_2O_5 erreicht. Bei Ver- wendung von Phosphorsäure für den Teilaufschluss weisen die erzeugten Rezyklate vergleichbare P- Gehalte wie konventionelle Dünger auf. Die für das Düngemittel erforderliche Löslichkeit ist entspre- chend durch die Säurezugabe einzustellen. Es ist anzunehmen, dass für diesen Verwertungsweg bei den entsprechenden Klärschlammmonoverbrennungsanlagen langfristig eine Selektion auf P-reiche und schwermetallarme Klärschlämme stattfinden wird.

Auch bei den **thermochemisch behandelten Aschen** ist der Einsatz auf Aschen aus schwermetallar- men Klärschlamm beschränkt. Wie oben beschrieben beeinflusst die Menge und Art der Additivzu- gabe sowohl die Pflanzenverfügbarkeit als auch die mögliche Schwermetallentfrachtung. Daher kann die Dünggeeignung der Rezyklate nicht generell bewertet werden. Gleichwohl sind die P-Gehalte etwas geringer als in der Asche, da die Additivzugabe eine gewisse Verdünnung herbeiführt. Die Rezyklate sind nicht wasserlöslich und daher nicht nach deutschem Düngerecht als P-Dünger zu etablieren. Für natrium-additivierte Rezyklate wurde jedoch die Neutral-Ammoniumcitrat-Löslichkeit festgestellt (Ja- cobi et al. 2022), sodass eine Vermarktung als EU-Düngemittel möglich ist, wie dies von entsprechen- den Marktteilnehmern angestrebt wird.

Die **nasschemisch erzeugten Rezyklate** (Phosphorsäure oder Calciumphosphat) sind am leichtes- ten verwertbar, da hieraus konventionelle Düngemittel erzeugt werden. Auch die Schwermetallent- frachtung und die „Abkopplung“ vom Ausgangsmaterial in der Kennzeichnung des Düngemittels kann die Marktakzeptanz verbessern. Überdies sind für die Phosphorsäure auch Anwendungszwecke au- ßerhalb der Düngemittelerzeugung denkbar.

7.8 Bodenschutz

Bayern verfolgt das Ziel, die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm aus Vorsorgegründen zu beenden, um insbesondere eine Schadstoffakkumulation langlebiger organischer Schadstoffe in den Böden und einen Eintrag von Keimen zu vermeiden (AbfPV 2014).

Die verschiedenen Verfahren der Mitverbrennung und Monoverbrennung von Klärschlamm (s. Kapitel 6) sind hinsichtlich der Zerstörung der organischen Schadstoffe und Keime gleich positiv zu bewerten. Hinsichtlich anorganischer Schadstoffe wird Quecksilber aufgrund der hohen Flüchtigkeit aus der Asche abgereichert und in die Gasphase überführt. Anlagen mit gezielter Quecksilberabscheidung, z. B. Müllheizkraftwerke und Monoverbrennungsanlagen, vermeiden Quecksilber-Immissionen.

Werden die Verbrennungsaschen aus der thermischen Behandlung für Düngemittel in der Landwirt- schaft eingesetzt, gelangen nicht flüchtige Schwermetalle, die nach der Verbrennung in Asche verblei- ben, wieder in den Boden. Wie in Abschnitt 7.5.2 beschrieben ist eine weitere Schwermetallentfrach- tung der verwertbaren Asche möglich. Durch diese Verwertungsart wird die in den Aschen enthaltene wertvolle Ressource Phosphor wieder genutzt.

Ein Sonderfall stellen Pyrolysate aus Klärschlamm dar. Deren Verwendung als Dünger wird vom wis- senschaftlichen Beirat für Düngungsfragen „aufgrund der Risiken durch Stör- und Schadstoffe grund- sätzlich abgelehnt“ (BMEL 2023). Eine entsprechende Verwendung ist in der Landwirtschaft zum

aktuellen Zeitpunkt nicht zulässig. Gleichzeitig weist der wissenschaftliche Beirat auf den Forschungsbedarf zu An- und Abreicherungsprozessen von Schwermetallen sowie den Abbau bzw. die Entstehung von organischen Schadstoffen während der Karbonisierung hin. Eine bodenbezogene Verwertbarkeit von Pyrolysat außerhalb der Landwirtschaft ist im Einzelfall zu prüfen.

7.9 Ressourcenschutz

Die Ressource Phosphor ist der wichtigste Inhaltsstoff des Klärschlammes. Derzeit werden verschiedene Verfahren erforscht und entwickelt, um den Phosphor aus Abwasser, Schlammwasser oder Klärschlamm zurückzugewinnen und einen vermarktungsfähigen Phosphordünger zu erzeugen.

Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken oder Müllheizkraftwerken ist eine nachträgliche Rückgewinnung des Phosphors nicht mehr möglich bzw. aufgrund der geringen Phosphorgehalte in den Rückständen nicht wirtschaftlich. Hier sollte eine möglichst weitgehende Phosphorrückgewinnung vor der Mitverbrennung erfolgen.

Für die Rückgewinnung des Phosphors aus Rückständen der thermischen Monobehandlung gibt es bereits mehrere Verfahren, die jedoch großtechnisch noch nicht umgesetzt sind. Eine Verwertung von Klärschlammaschen für Düngemittel ist grundsätzlich möglich. Unsicherheiten bestehen hinsichtlich der Nährstoffverfügbarkeit in den Aschen.

8 Kosten der Klärschlamm Entsorgung

Im November 2018 wurde eine Umfrage bei den Marktakteuren (Kläranlagen, Beauftragte Dritte und Entsorgungsunternehmen) durchgeführt. Neben den Entsorgungskosten wurde auch nach den zukünftigen Entwicklungen und den Vorstellungen der Marktakteure gefragt.

Die im Folgenden dargestellten Kosten basieren auf diesen Erhebungen des bifa Umweltinstitutes. Sofern nicht anders vermerkt, sind die Kosten der Klärschlamm Entsorgung in Brutto (inklusive MwSt.) angegeben. Inwieweit die Marktakteure in ihren Angaben Investition, Betriebskosten sowie Abschreibung und Zinsen mit einbezogen haben, wurde nicht abgefragt. Bei den folgenden Kostenangaben handelt es sich um Orientierungswerte, da auch teils nur wenige Akteure antworteten. Die tatsächlichen Kosten sind stark von den örtlichen Randbedingungen abhängig und müssen im konkreten Einzelfall ermittelt werden.

8.1 Speicherung

Von den Kläranlagen, die Angaben zu dem Thema Speicherung machten, können etwa 33 % der Kläranlagen Klärschlamm intern zwischenspeichern. Bei den meisten Kläranlagen bestehen Speichermöglichkeiten für mehrere Tage bis zu 3 Monaten. Lediglich 8 % der Kläranlagen mit Speichermöglichkeiten gaben an, dass sie das gesamte Winteraufkommen bzw. das gesamte Jahresaufkommen speichern können.

Die Kosten für eine externe Speicherung über mehrere Wochen liegen im Bereich von **5 bis 7 € je t entwässerter Klärschlamm**. Die geringe Anzahl der Rückmeldungen zu den Kosten der Speicherung lässt vermuten, dass die externe Speicherung von Klärschlämmen eher eine geringere Bedeutung hat.

Von Fall zu Fall sollte geprüft werden, ob ausreichende Lagerkapazitäten vorhanden sind oder ob zusätzliche Speichermöglichkeiten geschaffen werden können, um Entsorgungseingänge zu überbrücken und um damit die Entsorgungssicherheit zu erhöhen.

8.2 Transporte

8.2.1 Transporte von Nassschlamm

Nassschlamm (2 – 6 % TR) wird zu einer größeren Kläranlage transportiert, wenn eine Entwässerung (stationär oder mobil) vor Ort nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist.

Für den Transport des Nassschlammes zur Entwässerung lassen sich bis zu einer **Entfernung von 10 km** Orientierungswerte von **4 bis 11 €/m³ Nassschlamm** angeben. Je m³ Nassschlamm und km entspricht dies 0,40 bis 1,10 €.

Bei **Entfernungen bis 100 km** liegen nach Angabe eines Marktteilnehmers die Kosten bei etwa **20 €/m³ Nassschlamm**, entsprechend 0,20 € je m³ und km.

8.2.2 Transporte von entw. Schlamm

Falls der entwässerte Klärschlamm (ca. 25 % TR) zu einer Trocknungsanlage transportiert wird, können zur Orientierung die folgenden Transportkosten angegeben werden.

Bei Fahrten bis etwa **50 km** fallen Kosten von etwa **8,50 bis 9,50 €/t** an. Bei Fahrten bis etwa **100 km** steigern sich die Kosten auf etwa **11 bis 30 €/t**. Beträgt die Transportentfernung bis zu **200 km**, so

sind etwa **34 €/t** zu zahlen. Bei Transporten bis zu **400 km** liegen die Transportkosten **zwischen 30 und 68 €/t** Klärschlamm.

8.2.3 Transporte von getrocknetem Schlamm

Werden Klärschlämme nach der Trocknung zur thermischen Behandlung transportiert, fallen Kosten in den folgenden Größenordnungen an:

Bei Fahrten bis etwa **50 km** fallen Kosten von etwa **12 bis 15 €/t** an. Bei Fahrten bis etwa **100 km** steigern sich die Kosten auf etwa **20 €/t**. Bis **200 km** entsprechend **15 bis 22 €/t** und bis **400 km** entsprechend **30 bis 45 €/t**.

8.3 Entwässerung

Orientierungswerte für die Entwässerung des Klärschlammes können **im Mittel mit etwa 8 €/m³ Nassschlamm** angegeben werden, unabhängig von stationärer oder mobiler Entwässerung. In diesen Kosten sind die Investitionskosten und Betriebskosten (z. B. Stromkosten, Kosten für Konditionierungsmittel) enthalten. Die Spanne der Entwässerungspreise reicht von etwa **7 €** bis hin zu **10 €/m³ Nassschlamm**.

8.4 Trocknung

8.4.1 Solare Trocknung

Bei der Solartrocknung unterscheidet man zwischen der rein solaren Trocknung und der solarunterstützten Trocknung mit Abwärmenutzung.

Bei der rein solaren Trocknung muss in Bezug auf den Klärschlammumsatz mit relativ höheren Investitionskosten gerechnet werden, da für dieselbe Klärschlammmenge wesentlich größere Flächen benötigt werden als bei einer solarunterstützten Anlage.

Die spezifischen Investitionskosten (Annuität) einer rein solaren Klärschlamm Trocknungsanlage liegen zwischen **36 und 100 €/t (Mittelwert 68 €/t)** entwässerter Klärschlamm. Die Betriebskosten sind bei solarunterstützten Trocknungsanlagen aufgrund der Kosten für den Wärmeeinkauf sowie den höheren Stromverbrauch (z. B. Gebläse zur Verteilung der zugeführten Abwärme in der Halle) höher als bei rein solaren Trocknungsanlagen. Bei rein solaren Trocknungsanlagen schwanken die Betriebskosten in einem weiten Bereich und liegen zwischen **20 und 102 €/t (Mittelwert 61 €/t)** entwässertem Klärschlamm.

Die Kostenangaben zu Investitions- und Betriebskosten beruhen auf dem Mittelwert der Angaben von nur zwei Marktakteuren und sind daher als nur sehr bedingt repräsentativ einzustufen. Auf die Abschätzung von Jahresgesamtkosten wird daher verzichtet.

Nach neueren Angaben sind Kosten von **80 bis 100 €/t** entw. Klärschlamm für die solare Trocknung zu kalkulieren, wobei die Investitionskosten maßgeblich sind (Heindl, Ritterbusch 2024).

8.4.2 Thermische Trocknung

Die Trocknungskosten sind stark vom Durchsatz abhängig. Typische Werte sind gemäß (Heindl, Ritterbusch 2024) bei **60 bis 100 €/t** entw. Klärschlamm bei einem Anlagendurchsatz für entwässertem Klärschlamm von über 15.000 t/a. Bei thermischen Trocknern sind insbesondere die Kosten für die Wärme kostenrelevant.

8.5 Thermische Behandlungsverfahren

8.5.1 Monoverbrennung

Die Verwertungskosten in der Monoverbrennungsanlage betragen für entwässerten Klärschlamm **im Mittel etwa 118 €/t**, bei einer **Preisspanne von 56,50 bis 295 €** (inkl. Entwässerung). Die Verwertungskosten für getrockneten Klärschlamm liegen **im Mittel bei etwa 92 €/t**, bei einer **Preisspanne 58 € bis 130 €/t**.

In der Regel nehmen Monoverbrennungsanlagen entwässerten Klärschlamm an, da die meisten Anlagen zur Klärschlammverbrennung eine eigene Vortrocknung unter Ausnutzung der Abwärme der Verbrennungsanlage betreiben.

8.5.2 Mitverbrennung im Kohlekraftwerk/Biomassekraftwerk

Als Orientierungswerte für eine Mitverbrennung im Kohlekraftwerk können Kosten von **58 bis 90 €/t entwässerter Klärschlamm** angegeben werden. **Im Mittel sind dies 75 €/t**. In Bayern stand zur Mitverbrennung von Klärschlamm lediglich das Kohlekraftwerk Zolling zur Verfügung. Dieses nimmt nur entwässerten Klärschlamm an und verbrennt es seit 2025 im angeschlossenen Biomassekraftwerk.

8.5.3 Mitverbrennung im Müllheizkraftwerk

Für eine Mitverbrennung im Müllheizkraftwerk liegen die Orientierungswerte zwischen **69 und 110 €/t für entwässerten Klärschlamm**. **Im Mittel sind dies etwa 80 €/t**.

Für die Annahme von getrocknetem Klärschlamm werden Kosten zwischen **80 und 110 €/t** genannt. **Im Mittel sind dies 95 €/t**. Der Klärschlamm wird in der Regel mit einem TR-Gehalt von 80 bis 90 % angenommen oder entwässerter Klärschlamm wird mit vorhandener Verbrennungsenergie am Müllheizkraftwerk getrocknet.

8.5.4 Zementwerk

Als Orientierungswert für die Verwertung des Klärschlammes im Zementwerk kann man Kosten von **58 bis 107 €/t entwässerter Schlamm** ansetzen. Im Mittel sind dies etwa **78 €/t**. Ein Zementwerk nimmt getrocknete Klärschlämme mit etwa 80 % TR zu Preisen im Bereich von **25 bis 30 €/t** an. Von anderen Zementwerken in Bayern wurden keine Entsorgungspreise für Klärschlämme bekanntgegeben.

8.5.5 Vergasungs- und Pyrolyseverfahren

Vergasungs- und Pyrolyseverfahren für Klärschlamm spielen im derzeitigen Entsorgungsmarkt in Bayern keine Rolle. Entsorgungspreise konnten vor diesem Hintergrund nicht erhoben werden.

8.5.6 Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

Zur Verwertung in der Landwirtschaft kommen Nassschlämme und entwässerte Klärschlämme. Die Verwertungskosten liegen für Nassschlamm (3 – 5 % TR) im Bereich von **10 bis 29 €/m³**. Der Mittelwert liegt bei etwa **17 €/m³**. Entwässerte Klärschlämme gelangen zu Preisen von **30 bis 85 €/t**, im Mittel zu etwa **60 €/t** in die Verwertung zu Düngezwecken. Die günstigsten Verwertungskosten haben Kläranlagenbetreiber, die die Verwertung von Nassschlamm in Zusammenarbeit mit lokalen Landwirten durchführen.

8.6 Landbauliche Klärschlammverwertung (Rekultivierung)

Die Verwertungskosten in der Rekultivierung liegen für entwässerten Klärschlamm (25 – 30 % TR) im Bereich von **36 bis 110 €/t TM**. Im Mittel sind dies etwa **83 €/t**. Für die Abnahme getrockneter Klärschlämme fallen in einem Fall Entsorgungskosten im Bereich von gut **90 €/t** an.

8.7 Entsorgungskosten ab 2029

Als Teil der Klärschlammverwertung muss auch die Phosphorrückgewinnung mitberücksichtigt werden, insbesondere das verwendete Verfahren beeinflusst die Kosten. Verlässliche Kosten sind zum aktuellen Stand noch nicht zu nennen, da noch keine wesentlichen Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammasche im industriellen Maßstab bestehen und die gesetzliche Notwendigkeit erst ab 2029 greift.

Für ein nasschemisches Verfahren zur Phosphorrückgewinnung werden unter Berücksichtigung der oben genannten Unwägbarkeiten Kosten von 2 – 8 ct/m³ Abwasser geschätzt. Dies entspricht bei einem durchschnittlichen Abwasseranfall von 88 m³/EW a⁸ Abwasser pro Einwohnerwert und Jahr sowie einem Klärschlamm aufkommen von 19 kg TR/EW a Zusatzkosten von rund **90 – 370 €/t TM Klärschlamm**.

Die Mehrkosten für eine thermochemische Aschebehandlung, wenn diese direkt in die Verbrennung integriert wird, ist voraussichtlich maßgeblich durch Kosten für Additive bestimmt. Für diese Ausführung wird für das AshDec-Verfahren in der Umsetzung in Altenstadt angegeben, dass mit 8 % Natrium in der konditionierten Asche eine Phosphorlöslichkeit von mindestens 80 % in Neutral-Ammoniumcitrat erreicht wird (Leers et al. 2024). Bei Einsatz von Natriumcarbonat als Additiv (Na₂CO₃) und einem Aschegehalt des Klärschlammes von 45 % TR sind rund 90 kg Additiv je t TM Klärschlamm notwendig. Bei einem Schätzpreis des Additivs von 250 €/t belaufen sich die Betriebsmittelmehrkosten auf **22,5 €/t TM Klärschlamm**.

Falls die Kapazitäten zur Phosphorrückgewinnung 2029 noch nicht ausreichend vorhanden sein werden, besteht die gesetzliche Möglichkeit zur rückholbaren Lagerung von Klärschlammaschen, um die Phosphorrückgewinnung zu einem späteren Zeitpunkt durchführen zu können. Für eine solche Lagerung werden durch den Interessenverband deutscher Deponiebetreiber (InwesD) Kosten von bis zu 200 €/t Asche bei einfachem Einbau genannt (Haemig 2024). Dies entspräche bei einem Aschegehalt im Klärschlamm von 45 % TR von zusätzlichen Kosten von bis zu **90 €/t TM Klärschlamm**.

Die Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung und die damit häufig verbundene Verschiebung zur Monoverbrennung wird im Allgemeinen zu einer Erhöhung der Entsorgungskosten führen.

Bei Entsorgung von entwässertem Klärschlamm werden im Regelfall die Kosten je Tonne Originalsubstanz bemessen, gegebenenfalls zuzüglich Transportkosten. Eine Reduktion der abzugebenden Schlammmenge ist in diesem Zusammenhang erstrebenswert. Dies kann beispielsweise durch eine Erhöhung des Entwässerungsgrads oder durch eine verbesserte Stabilisierung und damit Reduktion der organischen Masse erreicht werden.

Eine Prognose zukünftiger Entsorgungspreise ist aufgrund der zahlreichen Unwägbarkeiten lediglich in Form von Orientierungswerten möglich. Eine solche Einschätzung ist durch (Könemann et al. 2024) gegeben. Die dort gegebenen Schätzungen decken sich mit Angaben, die das LfU von Marktteilnehmern erhalten hat. Entsprechende Orientierungswerte finden sich in Tab. 4.

⁸ Angabe nach DWA 2024 für Bayern

Tab. 4: Schätzung zu Entsorgungskosten für verschiedene Stufen und Varianten der Klärschlammverwertung ab 2029 von mech. entwässertem Klärschlamm (25 % TM).

Behandlungsschritt	Kosten in €/t TM	Kosten in €/t OS	Quelle
Bodenbezogene Verwertung	160 – 300	40 – 75	(Könemann et al. 2024)
Erwartete Kosten 2029 für Monoverbrennung ab Kläranlage abzüglich eingesparter Kosten der heutigen Ascheentsorgung	360 – 520	90 – 130	(Könemann et al. 2024)
Erwartete Kosten 2029 für Mitverbrennung ab Kläranlage	320 – 440	80 – 110	(Könemann et al. 2024)
Zwischenlagerung von Klärschlammaschen für eine spätere Aufbereitung (falls notwendig bei nicht ausreichenden Kapazitäten zur P-Rückgewinnung)	80 – 200	20 – 50	(Könemann et al. 2024)
Klärschlamm Trocknung, solar oder thermisch, mit Abwärmequelle	240 – 400	60 – 100	(Heindl, Ritterbusch 2024)
Nasschemische Phosphorrückgewinnung inkl. Transport/Entsorgung P-abgereicherte Asche	90 – 370	23 - 93	Betreiberangabe
Phosphorrückgewinnung mittels physikalisch-chemischer Aschebehandlung	122 – 135	30 – 34	Betreiberangabe
Phosphorrückgewinnung mittels thermochemischer Aschebehandlung	29 – 56	7 – 14	Schätzung ⁹
Phosphorrückgewinnung im Bereich der Abwasserbehandlung ¹⁰	61 – 78	15 – 20	(Kraus et al. 2019)

Zur Veranschaulichung der Gesamtkosten sind in Abb. 15 die Gesamtkosten für die Verwertung von entwässertem Klärschlamm über verschiedene Wege dargestellt. Der Entsorgungsweg „Mitverbrennung“ wird voraussichtlich im Vergleich zur Monoverbrennung geringere Kosten mit sich bringen, ist aber auf phosphorarme Klärschlamme begrenzt. Es zeigen sich die teilweise deutlichen Schwankungsbreiten für einen jeweiligen Verfahrenspfad.

Die Wirtschaftlichkeit einer Klärschlamm Trocknung ist maßgeblich durch die Möglichkeiten der thermischen Verwertung beeinflusst. Die Kosten für die Mono- und Mitverbrennung können deutlich gesenkt werden, gleichzeitig fallen für die Trocknung entsprechende Kosten an. Ist für den geplanten Entsorgungsweg nur die Annahme von vollgetrocknetem Klärschlamm möglich, ist die Trocknung obligatorisch.

Die möglichen Prozessvorteile für die Kläranlage durch die Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage können zu einer Kostenersparnis auf Seiten der Kläranlage führen. Jedoch ist dieses Optimierungspotenzial stark vom Status quo der Abwasserreinigung abhängig.

Durch die verschiedenen Möglichkeiten der Phosphorrückgewinnung im Zuge der thermischen Klärschlammverwertung ergibt sich eine weite Spannweite der erwartbaren Kosten. Dabei ist zu beachten, dass insbesondere die Schwermetallgehalte des Klärschlammes eine Limitation für entsprechende Rückgewinnungstechnologien mit sich bringen.

⁹ Grundlage der Schätzung sind Additivkosten für Na₂CO₃ (siehe Abschnitt 8.7) zuzüglich eines Aufschlagfaktors, um weitere Betriebs- und Anlagenkosten zu berücksichtigen.

¹⁰ Die Maßnahmen zur Phosphorrückgewinnung auf der Kläranlage können, beispielsweise durch Verringerung des Schlamm-aufkommens oder erhöhte Faulgasausbeute, negative Kosten generieren.

Die Zwischenlagerung von Klärschlammaschen ist rechtlich möglich, falls ab 2029 noch keine hinreichenden Phosphorrückgewinnungskapazitäten bestünden. Diese entbindet jedoch nicht von der Phosphorrückgewinnungspflicht und führt demnach zu einer weiteren Kostensteigerung.

Grundsätzlich sind die lokalen Gegebenheiten zu berücksichtigen, etwa die Infrastruktur und die Möglichkeiten für Trocknungs-, Monoverbrennungs- und Phosphorrückgewinnungstechnologien und die Zusammensetzung des zur verwertenden Klärschlamm.

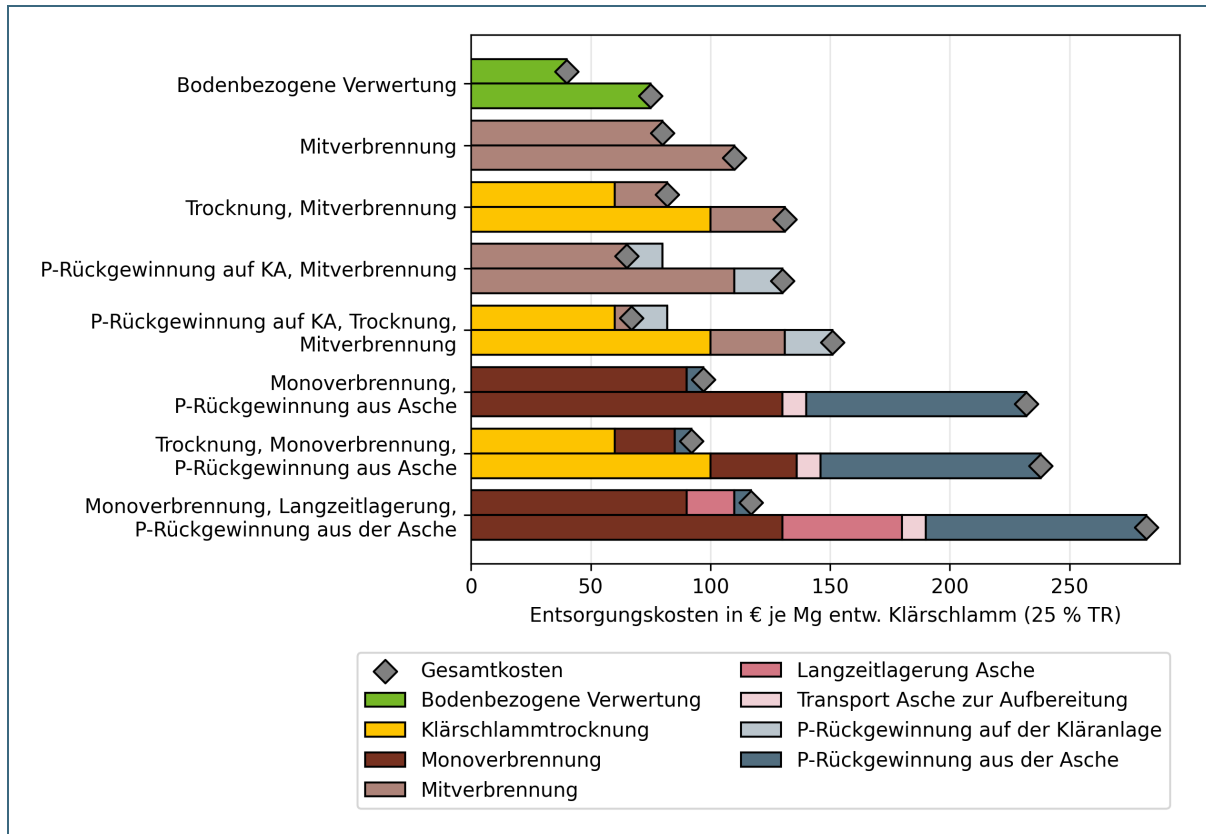


Abb. 15: Verwertungsszenarien zur Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung nach Entwässerung des Klärschlamm ab 2029, Darstellung jeweils als aufsummierte Minima und Maxima der Angaben gemäß Tab. 4, jeweils Annahme eines Aschegehalts im Klärschlamm von 45 % TR.

9 Möglichkeiten interkommunaler Zusammenarbeit

Die interkommunale Zusammenarbeit kann ein Instrument sein, um neue oder erhöhte Anforderungen an die kommunale Aufgabenerfüllung gemeinsam effizient und wirtschaftlich zu bewältigen. Durch die Bündelung von Fachkräften können leistungsfähige, für Arbeitnehmer attraktive Einheiten entstehen. Im besten Falle kommt die interkommunale Zusammenarbeit daher den kommunalen Aufgabenträgern mit ihren knappen finanziellen und personellen Ressourcen, den Bürgerinnen und Bürgern als Beitrags- und Gebührenzahlern und nicht zuletzt der Umwelt gleichermaßen zugute.

Projekte interkommunaler Zusammenarbeit sind keine Selbstläufer, sondern bedürfen eines grundlegenden Konsenses aller Beteiligten – politische Mandatsträger, Verwaltungen, Bürgerinnen und Bürger – zur Kooperation. Wichtig ist, dass sich die Partner auf Augenhöhe und transparent begegnen. Bestehen bereits leistungsfähige interkommunale Einheiten – etwa Zweckverbände oder gemeinsame Kommunalunternehmen, denen Aufgaben der Abwasserbeseitigung übertragen wurden – bietet sich unter Umständen eine Erweiterung ihres Aufgabenbereichs in Richtung Klärschlamm Entsorgung an.

Am Anfang der Überlegungen muss die Frage stehen, ob und gegebenenfalls in welchem konkreten Umfang interkommunale Zusammenarbeit stattfinden kann und soll. Dabei spielen fachrechtliche Aspekte, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen und nicht zuletzt Möglichkeiten staatlicher Förderung eine große Rolle. Erst in einem zweiten Schritt stellen sich dann Fragen nach der richtigen Rechtsform für das Projekt:

- Soll die interkommunale Zusammenarbeit auf vertraglicher Grundlage (z.B. im Rahmen einer Zweckvereinbarung) oder in einer eigenständigen, bereits bestehenden oder neu zu gründenden Rechtsform erfolgen?
- Welche Rechtsform ist für die Zusammenarbeit mehrerer Kommunen geeignet?
- Sollen private Dritte an der Rechtsform beteiligt werden?
- Soll der Rechtsform eine öffentlich-rechtliche Aufgabe mit den zugehörigen hoheitlichen Befugnissen übertragen werden?
- Wie viel Einflussnahme auf die Aufgabenerfüllung soll der Kommune künftig noch möglich sein?

Nachfolgende Ausführungen sollen eine erste Hilfestellung zu den vorgenannten Aspekten geben.

9.1 Grundsätzliche Überlegungen zur Zuständigkeit der Gemeinden

Die Abwasserbeseitigung ist eine der zentralen Aufgaben der Daseinsvorsorge. Sie wird von den Gemeinden als Pflichtaufgabe im eigenen Wirkungskreis in kommunaler Selbstverwaltung nach § 56 Satz 1 WHG (WHG 2009) i.V.m. Art. 34 Abs. 1 BayWG (BayWG 2010) wahrgenommen. Im Bereich der Abwasserbeseitigung kooperieren die Gemeinden bereits in unterschiedlicher Intensität und Form. Beispielsweise gibt es in Bayern rund 170 Zweckverbände zur Abwasserbeseitigung, die diese Aufgaben ganz oder teilweise von ihren Mitgliedsgemeinden übernommen haben. In diesen Fällen ist anhand der Verbands- oder Unternehmenssatzung zu prüfen, ob die Gemeinde, der Zweckverband oder das gemeinsame Kommunalunternehmen als Betreiber der Kläranlage der für die Zusammenarbeit bei der Klärschlamm Entsorgung maßgebliche Aufgabenträger ist. In der Folge soll der besseren Übersichtlichkeit halber auf die Gemeinde als Aufgabenträger abgestellt werden.

Zur Erfüllung der Aufgabe „Abwasserbeseitigung“ betreiben die Gemeinden Kläranlagen und sind damit die Erzeuger des in ihren Abwasserbehandlungsanlagen anfallenden Klärschlammes. Sie sind mithin Abfallerzeuger im Sinne des § 2 Abs. 11 AbfKlärV, denn bei einem im Sinne des § 54 Abs. 2 Satz 1

WHG entwässerten Klärschlamm handelt es sich um Abfall im Sinne von § 2 Abs. 2 AbfKlärV (AbfKlärV 2017)¹¹.

Nach der Regelung in § 3 Abs. 1 AbfKlärV, einer Bundesverordnung, hat der Klärschlammerzeuger, also die Gemeinde, „den in ihrer Abwasserbehandlungsanlage anfallenden Klärschlamm möglichst hochwertig zu verwerten, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist“.

Der Klärschlammerzeuger, also derjenige, der die Kläranlage betreibt, muss sich damit um die Verwertung des Klärschlammes kümmern. Erst wenn eine bodenbezogene Verwertung, eine Verwertung im Landschaftsbau oder eine energetische Verwertung technisch oder wirtschaftlich nicht mehr in zumutbarer Weise möglich ist, ist der Klärschlamm als Abfall zur Beseitigung den Landkreisen und kreisfreien Städten als den in Bayern für die Entsorgung von für die Abfallbeseitigung verantwortlichen Körperschaften zu überlassen. Nur Klärschlamm zur Beseitigung unterfällt also grundsätzlich einer abfallrechtlichen Überlassungspflicht.

Die Gemeinden, bei denen der Klärschlamm anfällt, müssen als Abfallerzeuger nach der abfallwirtschaftlichen Zielhierarchie für dessen möglichst hochwertige Verwertung sorgen. Im Rahmen der interkommunalen Zusammenarbeit kann diese Verantwortlichkeit auf andere Rechtsformen übertragen werden, weil die Gemeinden zur Erfüllung ihrer Aufgabe zur Errichtung, Übernahme, Erweiterung oder Beteiligung an gemeindlichen Unternehmen berechtigt sind (vgl. Art. 86, Art. 87 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 und Abs. 3 Satz 1 GO) (GO 1998). Soweit es sich um eine Tätigkeit handelt, die im Rahmen der kommunalen Daseinsvorsorge, hier also der Abwasserbeseitigung, mit wahrgenommen wird, kommt auch die Subsidiaritätsklausel des Art. 87 Abs. 1 Satz 1 Nr. 4 GO nicht zur Anwendung.

9.2 Aufgabenwahrnehmung in interkommunaler Zusammenarbeit

In Abgrenzung zur Aufgabe der Abfallentsorgung, für die andere Aufgabenzuweisungsregelungen gelten, gehören insbesondere folgende Tätigkeiten zu der in Folge der Abwasserbeseitigung notwendig werdenden Klärschlamm Entsorgung und sind für die interkommunale Zusammenarbeit, nicht zuletzt für eine Aufgabenübertragung auf einen bestehenden Zweckverband oder die Gründung eines Klärschlamm Entsorgungszweckverbandes oder eines gemeinsamen Kommunalunternehmens geeignet:

- Errichtung, Betrieb und Unterhaltung einer Klärschlamm Trocknungsanlage
- Vorhalten und Bereitstellung mobiler Anlagen zur Vorentwässerung von Klärschlamm an die beteiligten Gemeinden
- Besorgung des Transports des vorentwässerten Klärschlammes von den beteiligten Gemeinden zur Klärschlamm Trocknungsanlage
- Besorgung der ordnungsgemäßen energetischen Verwertung des getrockneten Klärschlammes oder im Falle fehlender Kapazitäten Überlassung an abfallrechtlich entsorgungspflichtige Körperschaften.

Weitere Aufgaben der abwasserbeseitigenden Einrichtungen können nach § 3 AbfKlärV sogar sein:

- möglichst hochwertige Verwertung des anfallenden Klärschlammes,
- Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm,
- Rückführung des gewonnenen Phosphors oder der phosphorhaltigen Klärschlammverbrennungssasche in den Wirtschaftskreislauf.

¹¹ Zur Abgrenzung Abwasserbeseitigung und Abfallentsorgung (unterschieden nach Abfall zur Verwertung und Abfall zur Beseitigung) siehe ausführlich Thimet in Wuttig/Thimet, Gemeindliches Satzungsrecht und Unternehmensrecht, Teil IX Frage 10

Die Klärschlammverordnung verpflichtet Betreiber von Kläranlagen bereits vor 2029, den von ihnen erzeugten Klärschlamm möglichst hochwertig zu verwerten und dabei eine Rückgewinnung von Phosphor anzustreben (vgl. § 3 Abs. 1 AbfKlärV). Demnach ist eine Phosphorrückgewinnung – auch jetzt schon - anzustreben oder, soweit eine Pflicht zur Phosphorrückgewinnung besteht, sind die Maßnahmen zur Erfüllung dieser Pflichten einschließlich der dafür notwendigen Vorbereitungsmaßnahmen wegen rechtlicher Anforderungen beim Betrieb der Einrichtung/Anlage zur Abwasserreinigung anfallende notwendige Kosten und somit mit den Abwassergebühren auf die Benutzer der Einrichtung/Anlage umzulegen.

Insbesondere in Bezug auf letztgenannte Aspekte sind dabei die haushaltsrechtlichen Gebote der Sparsamkeit und Wirtschaftlichkeit zu beachten (vgl. Art. 61 Abs. 2 GO). Gegebenenfalls können auch geeignete private Dritte, zum Beispiel im Rahmen öffentlich-privater Partnerschaften (ÖPP), in die Aufgabenerfüllung einbezogen werden (vgl. dazu unten 11.5.4).

9.3 Vermischungsverbot

Das Vermischungsverbot nach § 15 Abs. 3 AbfKlärV, nach dem die Abgabe und das Auf- und Einbringen eines Klärschlammes, der mit Klärschlämmen aus Abwasserbehandlungsanlagen mit einer genehmigten Ausbaugröße ab 1.000 Einwohnerwerten vermischt wurde, u.a. nur dann zulässig sind, wenn es sich um Klärschlämme aus Abwasserbehandlungsanlagen desselben Klärschlammherstellers handelt, stellt kein Hindernis für eine kommunale Zusammenarbeit dar, soweit die Klärschlämme einer thermischen Behandlung zugeführt werden. Denn das Vermischungsverbot bezieht sich nach seiner systematischen Einordnung in der AbfKlärV und seinem Sinn und Zweck ausschließlich auf die Abgabe von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost mit dem Zweck der nachfolgenden Verwertung auf und in Böden.

Eine Vermischung von Klärschlamm vor einer Klärschlammmonoverbrennung ist zulässig, dies wird auch durch die Folgeänderungen der AbfKlärV nicht belangt.

9.4 Rechtsrahmen

Im Rahmen der Rechtsformenwahl spielen auch steuerrechtliche Gesichtspunkte eine Rolle. Tiefergehende Ausführungen sind angesichts der Komplexität des Steuerrechts und wegen der erforderlichen Einzelfallbetrachtung in dieser Publikation nicht möglich.

Bei Projekten interkommunaler Zusammenarbeit sind auch vergaberechtliche Aspekte zu berücksichtigen. Auf die Übertragung von gemeindlichen Aufgaben mit den zugehörigen Befugnissen auf einen Zweckverband oder ein gemeinsames Kommunalunternehmen ist das Vergaberecht in der Regel von vorneherein nicht anwendbar (vgl. EuGH, Urte. vom 21.12.2016, Rs. C-51/15 „Zweckverband Abfallwirtschaft“; OLG Celle, Beschl. vom 3.8.2017, Verg. 3/13). Im Übrigen kommen die in § 108 GWB aufgeführten Ausnahmetatbestände (sogenannte Inhouse- oder Instate-Geschäfte) in Betracht.

Wird das Unternehmen von den beteiligten Gemeinden oder sonstigen öffentlichen Aufgabenträgern finanziert, ist darüber hinaus auch eine beihilferechtliche Prüfung erforderlich. Dies setzt voraus, dass die Voraussetzungen einer EU-Beihilfe im Sinne von Art. 107 AEUV erfüllt sind. Zum Beispiel ist nach EuGH, Urte. vom 18.2.2016, Rs. C-446/14 („Zweckverband Tierkörperbeseitigung“), die von den Mitgliedern eines Zweckverbands erhobene Umlage keine Beihilfe in diesem Sinne, wenn sie nach vorab festgelegten Kriterien ausschließlich zur Finanzierung von gemeinwirtschaftlichen Verpflichtungen eines Zweckverbands erhoben wird.

Zu beachten ist, dass die Errichtung von Zweckverbänden oder Unternehmen wie auch der Abschluss von Zweckvereinbarungen der Anzeige an oder der Genehmigung durch die zuständige Aufsichtsbehörde unterliegen (vgl. Art. 96 GO; Art. 12, Art. 48 KommZG) (KommZG 2023). Eine frühzeitige Einbindung der Aufsichtsbehörde in das Projekt ist daher sehr zu empfehlen.

9.5 Organisationsformen

Interkommunale Zusammenarbeit zur Klärschlammmentsorgung kann im Rahmen vertraglicher Vereinbarungen zwischen den beteiligten Gemeinden, durch Gründung von Zweckverbänden oder gemeinsamen gemeindlichen Unternehmen sowie durch Erweiterung des Aufgabenbereichs bestehender Zweckverbände bzw. gemeinsamer gemeindlicher Unternehmen zur Abwasserentsorgung stattfinden. Als Unternehmensformen kommen das gemeinsame Kommunalunternehmen und Privatrechtsformen in Betracht.

Haben die Gemeinden die Aufgabe der Abwasserbeseitigung insgesamt oder den Betrieb der Kläranlage bereits auf einen Zweckverband oder ein (gemeinsames) Kommunalunternehmen übertragen, können sich dieser Zweckverband oder dieses (gemeinsame) Kommunalunternehmen nach Maßgabe der einschlägigen Vorschriften (z. B. Art. 1 Abs. 2, Art. 7 Abs. 5 KommZG; Art. 89 Abs. 1 Satz 2 GO (GO 1998)) an der interkommunalen Zusammenarbeit beteiligen.

9.5.1 Zweckvereinbarung, öffentlich-rechtlicher Vertrag

Nach Art. 7 Abs. 2 KommZG können die beteiligten Gebietskörperschaften aufgrund einer Zweckvereinbarung einzelne oder alle mit einem bestimmten Zweck zusammenhängenden Aufgaben übertragen (sogenannte Übertragungszweckvereinbarung). Die beteiligten Gebietskörperschaften können nach Art. 7 Abs. 3 KommZG auch vereinbaren, einzelne oder alle mit einem bestimmten Zweck zusammenhängende Aufgaben gemeinschaftlich durchzuführen und hierzu gemeinschaftliche Einrichtungen schaffen oder zu betreiben (sogenannte Gemeinschaftszweckvereinbarung). An einer solchen Zweckvereinbarung können sich neben den Gemeinden auch Zweckverbände (vgl. Art. 1 Abs. 2 Satz 1, Art. 7 Abs. 5 KommZG) und (gemeinsame) Kommunalunternehmen (vgl. Art. 1 Abs. 2 Satz 2 KommZG) beteiligen.

Im Rahmen einer Zweckvereinbarung können – anders als bei sonstigen Verträgen – neben einer Aufgabe auch die zugehörigen hoheitlichen Befugnisse übertragen werden (vgl. Art. 8, Art. 11 KommZG; vgl. zum weiteren Mindestinhalt einer solchen Zweckvereinbarung zudem die Art. 10 und Art. 14 KommZG). Die Zweckvereinbarung bedarf mindestens der Anzeige bei der Aufsichtsbehörde. Werden Befugnisse übertragen, ist sie genehmigungspflichtig (vgl. Art. 12 KommZG).

Daneben sind grundsätzlich auch sonstige öffentlich-rechtliche oder privatrechtliche Vereinbarungen zwischen den beteiligten Aufgabenträgern denkbar.

Der Vorteil einer Zusammenarbeit auf vertraglicher Grundlage liegt darin, dass sie im Vergleich zu einer institutionellen Zusammenarbeit im Rahmen einer zu gründenden Organisationsform in der Regel zeitlich schneller und weniger aufwändig umzusetzen ist. Der Abschluss einer Zweckvereinbarung mag sich darüber hinaus in solchen Fällen anbieten, in denen einzelne Gemeinden oder kleinere Zweckverbände die oben genannten Aufgaben einem benachbarten leistungsfähigen Abwasserentsorger übertragen wollen. Zu berücksichtigen ist allerdings, dass die Vertragspartner, die eine Aufgabe auf einen anderen Beteiligten übertragen haben, in der Regel keine oder nur sehr eingeschränkte – nämlich die im Vertrag geregelten – Einflussnahmemöglichkeiten haben. Hinzu kommt, dass gerade in investitionsintensiven Bereichen eine zeitliche Mindestbindungsfrist einzuräumen ist, um dem die Aufgabe übernehmenden Vertragspartner eine wirtschaftliche Erfüllung dieser Aufgaben zu ermöglichen.

Neben den oben genannten Gesichtspunkten sind auch Auswirkungen im Bereich des Vergaberechts (vgl. § 108 Abs. 6 GWB (GWB 2013)) und des Umsatzsteuerrechts (vgl. den spätestens ab 1.1.2021 greifenden § 2b UstG (UStG 2005)) zu berücksichtigen.

9.5.2 Zweckverband

Der Zweckverband ist die „klassische“ Form institutionalisierter interkommunaler Zusammenarbeit. Der Zweckverband stellt als Körperschaft des öffentlichen Rechts eine eigene Rechtsperson dar (Art. 1 Abs. 3 KommZG). Mitglieder eines Zweckverbands können die Gemeinden, aber auch andere Zweckverbände oder (gemeinsame) Kommunalunternehmen und unter bestimmten Voraussetzungen auch Private sein (vgl. Art. 17 Abs. 1 und 2 KommZG). Letzteres ist wegen der Beschränkung der Stimmrechte Privater nach Art. 31 Abs. 1 Satz 4 KommZG allerdings selten anzutreffen.

Der Zweckverband entsteht durch Bekanntgabe der von den Beteiligten zu vereinbarenden Verbandsatzung, die bestimmte Mindestinhalte aufweisen muss (vgl. Art. 18 ff. KommZG).¹²

Die beteiligten Aufgabenträger können dem Zweckverband einzelne oder alle mit einem bestimmten Zweck zusammenhängenden Aufgaben mit den zugehörigen Hoheitsrechten zur eigenverantwortlichen Wahrnehmung übertragen (Art. 17 Abs. 1, Art. 22 KommZG). Der Zweckverband ist mit eigenen Organen ausgestattet, nämlich dem Verbandsvorsitzenden und der Verbandsversammlung (Art. 29 ff. KommZG). Während das laufende Tagesgeschäft dem Verbandsvorsitzenden mit seiner Geschäftsstelle obliegt, sind Entscheidungen über die strategische und operative Ausrichtung des Zweckverbands Aufgabe der Verbandsversammlung (Art. 34, Art. 36 KommZG). Jedes Verbandsmitglied entsendet mindestens einen Vertreter in die Verbandsversammlung. Mehrfachvertretungen bzw. Mehrfachstimmrechte zugunsten einzelner Verbandsmitglieder können in der Verbandssatzung vorgesehen werden, wobei die Vertretung im angemessenen Verhältnis zum Anteil des jeweiligen Verbandsmitglieds an der Erfüllung der Aufgabe stehen soll (vgl. Art. 31 KommZG). Die Verbandsräte unterliegen einem allgemeinen Weisungsrecht der entsendenden Gemeinde (vgl. Art. 33 Abs. 2 Satz 4 und 5 KommZG). Dadurch sind die Verbandsräte eng an das jeweilige Verbandsmitglied gebunden. Unter Umständen wird eine Beschlussfassung in den Gemeinde- und Stadträten der Verbandsmitglieder erforderlich, die zu Lasten einer flexiblen Entscheidungsfindung auf Zweckverbandsebene gehen kann.

Soweit die Einnahmen des Zweckverbands nicht ausreichen, finanziert er sich über eine Umlage der Verbandsmitglieder. Der Umlegungsschlüssel ist in der Verbandssatzung festzulegen (Art. 42 KommZG).

Die Wirtschaftsführung des Zweckverbands orientiert sich an den für die Gemeinden geltenden Vorschriften. Insbesondere kann sich auch ein Zweckverband wirtschaftlich betätigen (vgl. Art. 40 KommZG). Hinsichtlich der Bindung an vergaberechtliche Regelungen und der steuerlichen Behandlung eines Zweckverbands gelten ebenfalls grundsätzlich dieselben Kriterien wie bei den Gemeinden.

Aufgrund ihrer Verbreitung und ihrem Bekanntheitsgrad bei den kommunalen Mandats-trägern ist die Rechtsform des Zweckverbands für die interkommunale Zusammenarbeit gut geeignet. Im Vergleich zum Kommunalunternehmen (siehe. 11.5.3) ist der Zweckverband enger an die Verbandsmitglieder angebunden, was die Entscheidungswege unter Umständen verlängert. Eine Beteiligung Privater ist nur eingeschränkt möglich.

¹² Aktuelle Muster einer Verbandssatzung eines Zweckverbands zur Wasserversorgung und eines Zweckverbands zur Abwasserbeseitigung mit umfassenden Erläuterungen finden sich z.B. bei Thimet/Gaß, Kommunalabgaben- und Ortsrecht in Bayern, Teil VI – 2.21 und 2.22.

9.5.3 Gemeinsames Kommunalunternehmen

Das gemeinsame Kommunalunternehmens (gKU) wurde 2004 aufgrund der positiven Erfahrungen mit dem gemeindlichen Kommunalunternehmen eingeführt und ist daher die „jüngste“ Rechtsform interkommunaler Zusammenarbeit. Als Vorteil wird insbesondere die den Kommunen eingeräumte Möglichkeit gesehen, die Steuerung des Unternehmens nach ihren Bedürfnissen flexibel in der Unternehmenssatzung zu regeln. Mit dem gKU sollten die öffentlich-rechtlichen Vorteile eines Zweckverbands mit der Flexibilität einer Privatrechtsform kombiniert werden.¹³

Das gKU ist eine Anstalt des öffentlichen Rechts mit eigener Rechtspersönlichkeit. Die rechtlichen Grundlagen des gKU ergeben sich aus den Art. 49, Art. 50 KommZG in Verbindung mit den Regelungen zum gemeindlichen Kommunalunternehmen in den Art. 89 bis 91 GO. Wie dem Zweckverband können auch dem gKU einzelne oder alle mit einem bestimmten Zweck zusammenhängende Aufgaben zur selbständigen Erledigung mit den zugehörigen Hoheitsrechten übertragen werden.

Anstaltsträger, d. h. Beteiligte an dem gKU, können u.a. Gemeinden, aber auch Zweckverbände und Kommunalunternehmen sein¹⁴. Private können sich dagegen nicht an einem gKU beteiligen.

Das gKU ist geprägt von einer Vorstandsverfassung. Grundsätzlich leitet der Vorstand des gKU das Unternehmen in eigener Verantwortung (Art. 90 Abs. 1 GO). Der Vorstand kann aus einer oder mehreren Personen bestehen. Der Verwaltungsrat, das zweite Unternehmensorgan, in das die Anstaltsträger Mitglieder ähnlich wie beim Zweckverband entsenden, hat vor allem Überwachungsfunktion. Zudem bestellt er den Vorstand. Darüber hinaus stehen dem Verwaltungsrat die in Art. 90 Abs. 2 Satz 3 GO geregelten Kompetenzen für wichtige Entscheidungen im gKU zu. Weitere Geschäfte, zu denen der Vorstand der Zustimmung des Verwaltungsrats bedarf, können in der Unternehmenssatzung geregelt werden. Ein allgemeines Weisungsrecht gegenüber dem Vorstand besteht aber nicht. Ebenso wenig existiert ein allgemeines Weisungsrecht der Anstaltsträger gegenüber den von ihnen in den Verwaltungsrat entsandten Mitgliedern; ein solches besteht ausschließlich im Falle des Erlasses von Satzungen oder Verordnungen durch das gKU oder in sonstigen kraft Satzung geregelten Einzelfällen (vgl. Art. 90 Abs. 2 Sätze 4 und 5 GO). Im Übrigen enthält Art. 50 Abs. 2 KommZG Regelungen zum Pflichtinhalt der Satzung. Auf die Gestaltung der Unternehmenssatzung sollte in der Gründungsphase daher große Sorgfalt verwendet werden: So viel unternehmerische Freiheit wie möglich, so viel Einflussnahme wie nötig!¹⁵

Für die Verbindlichkeiten des gKU haften die Anstaltsträger als Gesamtschuldner, soweit diese nicht vom gKU innerhalb von fünf Jahren getragen werden können (vgl. Art. 89 Abs. 4 GO; § 14 Abs. 2 KUV); der Ausgleich im Innenverhältnis zwischen den Anstaltsträgern erfolgt nach einem in der Satzung geregelten Schlüssel oder kraft Gesetzes nach dem Verhältnis der Stammeinlagen.

Die Buchführung des gKU erfolgt – anders als beim Zweckverband – kraft Gesetzes (vgl. § 20 KUV) nach den Regeln der kaufmännischen doppelten Buchführung. Jahresabschluss und Lagebericht unterliegen der Jahresabschlussprüfung nach HGB (vgl. Art. 91 Abs. 1 GO; § 27 KUV).

Ein weiterer Unterschied zum Zweckverband besteht darin, dass das gKU nur nach Bundesrecht oberhalb der einschlägigen Schwellenwerte zur Anwendung des Vergaberechts verpflichtet ist. Steuerrechtlich gelten aber grundsätzlich dieselben Kriterien wie bei den Gemeinden.

¹³ Ausführlich dazu Gaß, Interkommunale Zusammenarbeit in Zweckverbänden und gKUs, BayGT 1/2017, S. 8, abrufbar unter www.bay-gemeindetag.de/Informationen/ZeitschriftBayerischerGemeindetag.

¹⁴ So Schulz/Wachsmuth/Zwick et al., Kommunalverfassungsrecht Bayern, Band II, Erl. 3.1 zu Art. 49 KommZG.

¹⁵ Vgl. dazu Gaß/Popp, Gemeinde als Unternehmer, Band 7 der Praxisreihe des Bayerischen Gemeindetags, 2. Aufl. 2018, Kap. 9 und die Beispiele für Unternehmenssatzungen in Kap. 16, 5. und 6.

Insgesamt ist das gKU durch eine stärkere Verselbstständigung gegenüber den Unternehmensträgern gekennzeichnet. Es kann daher tendenziell effizienter geführt werden und ist daher vor allem für operative Aufgabenfelder gut geeignet.

9.5.4 Privatrechtsformen

Gemeinden können sich unter bestimmten Voraussetzungen auch in Rechtsformen des Privatrechts wirtschaftlich betätigen (vgl. Art. 86 Nr. 3, Art. 87, Art. 92 ff. GO). Verbreitet sind dabei in Bayern vor allem die Gesellschaftsformen der GmbH und der GmbH & Co.KG¹⁶. Gesellschafter dieser Rechtsformen können sowohl Gebietskörperschaften als auch sonstige öffentlich-rechtliche Körperschaften und Anstalten (vgl. für den Zweckverband Art. 40 Abs. 1 KommZG; für das KU Art. 89 Abs. 1 Satz 2 GO) sein. Diese Rechtsformen sind also grundsätzlich auch für interkommunale Kooperationen geeignet. Darüber hinaus können sich natürliche und juristische Personen des Privatrechts – z.B. Tochtergesellschaften von Gemeinden oder private Dritte – an Privatrechtsformen beteiligen. Damit kommt eine Öffentlich-Private Partnerschaft (ÖPP) im Rahmen eines Gesellschaftsmodells ebenso in Betracht.¹⁷

Ein wesentlicher Unterschied zu den vorgenannten öffentlich-rechtlichen Rechtsformen besteht darin, dass die beteiligten Gemeinden eine ihnen obliegende Aufgabe nicht mit pflichtbefreiender Wirkung auf die Privatrechtsform übertragen können. Die Privatrechtsform wird lediglich als „Erfüllungsgehilfe“ der beteiligten Gemeinden tätig, die weiter die ordnungsgemäße Wahrnehmung der Aufgabe gewährleisten müssen. Ebenso wenig können hoheitliche Befugnisse, zum Beispiel der Erlass von Satzungen oder Bescheiden, auf Privatrechtsformen übertragen werden; Ausnahmen hierzu bedürfen einer gesetzlichen Regelung.

9.5.4.1 Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH)

Die GmbH ist eine sogenannte Kapitalgesellschaft, bei der sich das Stimmrecht der Gesellschafter nach der Höhe ihrer Kapitaleinlage richtet (§ 47 Abs. 2 GmbHG). Das geringste mögliche Stammkapital der GmbH beträgt – mit Ausnahme der Unternehmergesellschaft nach § 5a GmbHG – 25.000 €. Die Haftung gegenüber den Gläubigern ist auf das Gesellschaftsvermögen beschränkt (vgl. §§ 1, 13 GmbHG). Dies ist wichtig wegen der kommunalrechtlichen Vorgabe der Haftungsbeschränkung aus Art. 92 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 GO.

Die GmbH hat mindestens zwei Unternehmensorgane, die Geschäftsführung und die Gesellschafterversammlung. Die Geschäftsführung trifft grundsätzlich alle erforderlichen Maßnahmen und Entscheidungen zur Verfolgung des Gesellschaftszwecks und vertritt die Gesellschaft nach außen (vgl. § 35 GmbHG). Die Geschäftsführungsbefugnis kann allerdings durch gesellschaftsvertragliche Regelungen – etwa durch Normierung zustimmungspflichtiger Rechtsgeschäfte - oder durch Beschluss der Gesellschafter und Erteilung von Weisungen im Einzelfall weitgehend eingeschränkt werden (vgl. §§ 37 Abs. 1, 45 Abs. 1 GmbHG). Zu beachten ist, dass erste Bürgermeister oder ehrenamtliche Gemeinderatsmitglieder nicht gleichzeitig Geschäftsführer einer Gesellschaft sein können, an der die Gemeinde mit mehr als 50 Prozent beteiligt ist (vgl. Art. 34 Abs. 5 Nr. 1, Art. 31 Abs. 3 Satz 1 Nr. 3 GO).

In der Gesellschafterversammlung sind die Vertreter der Gesellschafter – in der Regel die ersten Bürgermeister und die gesetzlichen Vertreter sonstiger beteiligter Körperschaften und Anstalten - versammelt (vgl. dazu Art. 93 Abs. 1 GO). Sie ist kraft Gesetzes zur Entscheidung grundlegender Fragen berufen (vgl. § 46 GmbHG), z.B. zur Feststellung des Jahresabschlusses, zur Entlastung der Geschäftsführung und zur Entscheidung über die Ergebnisverwendung; weitere Zuständigkeiten können im

¹⁶ Zu weiteren denkbare Privatrechtsformen wie etwa der Aktiengesellschaft (AG) oder der Genossenschaft vgl. Gaß/Popp (Fn. 4), Kap. 11 bis 14.

¹⁷ Weitere Informationen zum Thema ÖPP unter www.stmb.bayern.de/buw/bauthemen/ppp.

Gesellschaftsvertrag geregelt werden. Darüber hinaus haben die einzelnen Gesellschafter umfassende Auskunfts- und Einsichtsrechte gegenüber der Geschäftsführung (§ 51a GmbHG).

Daneben kann der Gesellschaftsvertrag die Einrichtung eines Aufsichtsrats vorsehen, in den die Beteiligten Vertreter entsenden (vgl. Art. 93 Abs. 2 GO)¹⁸. Der Aufsichtsrat hat dann – anstelle der Gesellschafterversammlung – die Aufgabe, die Geschäftsführung zu überwachen. Zudem können ihm durch den Gesellschaftsvertrag weitere Befugnisse, z.B. die Zustimmung zu bestimmten Rechtsgeschäften der Geschäftsführung, übertragen werden. Ein Weisungsrecht der entsendenden Gemeinde gegenüber ihren Aufsichtsratsmitgliedern besteht nur, wenn dies im Gesellschaftsvertrag ausdrücklich vorgesehen ist.¹⁹

Wie gezeigt lässt das GmbHG den Gesellschaftern große Spielräume bei der Ausgestaltung des Gesellschaftsvertrags. Der Erlass und jede Änderung des Gesellschaftsvertrags sind notariell zu beurkunden (§§ 2, 53 GmbHG). Die GmbH wird mit der Eintragung in das Handelsregister wirksam (§ 11 GmbHG).

Die Rechnungslegung der GmbH richtet sich nach den Vorschriften des HGB und des GmbHG. Jahresabschluss und Lagebericht unterliegen der Jahresabschlussprüfung nach HGB (vgl. dazu Art. 94 Abs. 1 Satz 1 Nrn. 1 und 2 GO). Wie das gKU sind auch die gemeindlichen Unternehmen in Privatrechtsformen nur nach Bundesrecht oberhalb der einschlägigen Schwellenwerte zur Anwendung des Vergaberechts verpflichtet.

Eine Besonderheit der GmbH gegenüber öffentlich-rechtlichen Rechtsformen besteht im Hinblick auf das Steuerrecht. Die GmbH unterliegt kraft Gesetzes in vollem Umfang der Körperschaftsteuer, der Gewerbesteuer und der Umsatzsteuer. Bei den öffentlich-rechtlichen Rechtsformen unterliegt nur die wirtschaftliche Tätigkeit (der sogenannte Betrieb gewerblicher Art) der Körperschaftsteuer und der Gewerbesteuer, nicht eine hoheitliche Betätigung.

Festzustellen ist, dass die GmbH wie auch das gKU flexible, an das jeweilige Aufgabenfeld angepasste Unternehmensstrukturen zulässt. Im Gegensatz zum gKU ist die GmbH für öffentlich-private Kooperationen geeignet. Nachteilig können die höheren Gründungs- und Betriebskosten sein. Mögliche steuerrechtliche Vorteile sind im Einzelfall zu prüfen.

9.5.4.2 GmbH & Co. KG

Die GmbH & Co. KG stellt eine Mischform zwischen Personen- und Kapitalgesellschaft dar. Das Dach der Gesellschaft bildet eine Personengesellschaft, nämlich die Kommanditgesellschaft (KG). Diese besteht aus zwei Arten von Gesellschaftern: Beim Kommanditisten ist die Haftung gegenüber Dritten auf den Betrag der Vermögenseinlage beschränkt, während der Komplementär unbeschränkt haftet, dafür aber auch zur Geschäftsführung und Vertretung der Gesellschaft befugt ist (vgl. §§ 161 Abs. 1, 164, 170, 171 HGB (HGB 2024)). Um die Vorgabe einer Haftungsbeschränkung für die gemeindegewirtschaftliche Betätigung in Art. 92 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 GO zu erfüllen und gleichzeitig ausreichend Einfluss auf die Gesellschaft nehmen zu können, können sich die kooperierenden Gemeinden an einer GmbH beteiligen, die wiederum Komplementär in der KG wird. Die Geschäftsführung der GmbH übernimmt dann gleichzeitig die Geschäftsführung und Außenvertretung der KG. Der öffentliche Zweck, der mit der GmbH & Co.KG verfolgt werden soll (vgl. Art. 92 Abs. 1 Satz 1 Nr. 1 GO), wird im

¹⁸ Bei einer GmbH mit in der Regel mehr als 500 Arbeitnehmern ist zwingend ein Aufsichtsrat einzurichten, vgl. § 1 MitbestG; § 1 Abs. 1 Nr. 3 DrittelbG.

¹⁹ Ausführlich zu den Rechten und Pflichten des Aufsichtsrats Gaß/Popp (Fn. 4) Kap. 11 Erl. 2.3.

Gesellschaftsvertrag der KG festgeschrieben. Gesellschaftszweck der GmbH ist die Geschäftsführung und Vertretung der KG. Im Übrigen gelten für die GmbH die obigen Ausführungen.

Die Gemeinden und sonstigen Beteiligten können sich neben der Stellung als Gesellschafter der Komplementär-GmbH darüber hinaus als Kommanditisten an der GmbH & Co. KG beteiligen. Den Kommanditisten stehen im Rahmen der Gesellschafterversammlung das Recht zur Feststellung des Jahresabschlusses, zur Feststellung der Ergebnisverwendung sowie das Recht zur Entlastung der Geschäftsführung zu. Darüber hinaus haben die Kommanditisten Einsichtsrechte in die Bücher der Gesellschaft (§ 166 Abs. 1 HGB). Sonstige weitergehende Rechte stehen den Kommanditisten nicht zu.

Für die Gründung der GmbH & Co.KG müssen zwei Gesellschaftsverträge beschlossen werden. Zur Entstehung der GmbH siehe oben. Die GmbH & Co.KG entsteht dann nach Beschluss des Gesellschaftsvertrags der KG durch die Beteiligten und die Eintragung der Gesellschaft ins Handelsregister (vgl. §§ 161 Abs. 2, 108, 123 Abs. 1 HGB).

Für die Rechnungslegung der GmbH & Co.KG gelten nach § 264a HGB die Vorschriften wie bei Kapitalgesellschaften. Ebenso hat eine Abschlussprüfung zu erfolgen. Dies gilt auch für die Komplementär-GmbH. Hinsichtlich des Vergaberechts kann auf die Ausführungen zum gKU und zur GmbH Bezug genommen werden.

Die Gesellschaftsform der GmbH & Co.KG lässt ebenfalls flexible, der Aufgabenstellung angepasste Unternehmensstrukturen zu. Weitere Kapitalgeber können als Kommanditisten in die Gesellschaft eingebunden werden, ohne dass der Einfluss der Komplementär-GmbH auf die Geschäftsführung beeinträchtigt wird. Der erhöhte Aufwand bei Gründung und Betrieb der Gesellschaft kann durch steuerliche Vorteile gerechtfertigt sein, weil die Steuerbelastung bei Gewinnausschüttungen tendenziell niedriger ausfällt als bei der reinen GmbH. Kosten und Vorteile der Rechtsform sind im Einzelfall einander gegenüber zu stellen.

9.6 Möglichkeiten der Förderung

Es wird vorab darauf hingewiesen, dass bei vielen Fördermöglichkeiten eine Doppelförderung unterliegt. Es wird empfohlen, frühzeitig vergleichende Betrachtungen anzustellen, welche Förderung für das Projekt am günstigsten ist.

9.6.1 Förderung der interkommunalen Zusammenarbeit

Wenn Sie als bayerische Kommune mit Ihren bayerischen Nachbarkommunen neue Kooperationsprojekte zum Wohl der Bürgerinnen und Bürger planen, können Sie unter bestimmten Voraussetzungen einen Zuschuss bekommen. Der Freistaat Bayern unterstützt Sie bei der Vorbereitung und Durchführung neuer, vorbildhafter Projekte der interkommunalen Zusammenarbeit (Kooperationsprojekte).

Zu den Aufgabenbereichen der interkommunalen Kooperationsprojekte gehören insbesondere Erledigung von allgemeinen Verwaltungstätigkeiten der Kommunen sowie Aufgaben der sozialen und kulturellen Daseinsvorsorge und der kommunalen Infrastruktur.

Die Zusammenarbeit soll sich auf wesentliche Bereiche des Verfahrens, die mit personellen, strukturellen oder organisatorischen Veränderungen bei den an der Kooperation Beteiligten verbunden sind, beziehen. Sie soll Vorbildcharakter für das Handlungspotenzial interkommunaler Zusammenarbeit haben.

Sie erhalten die Förderung als Zuschuss. Die Höhe der Förderung beträgt 50.000 € je Kooperationsprojekt, jedoch maximal 85 Prozent der zuwendungsfähigen Ausgaben. In besonders ausgewiesenen

Fördergebieten mit besonderem Handlungsbedarf ist eine erhöhte Zuwendung bis zu 90.000 € möglich. Die Bagatellgrenze liegt bei 5.000 €.

Das Kooperationsprojekt ist dauerhaft einzurichten, mindestens jedoch für fünf Jahre.

Durch die Zusammenarbeit soll eine Einsparung der personellen und sächlichen Ausgaben in den kooperierenden Aufgabenbereichen von mindestens 15 % pro Jahr erzielt werden. Dabei bleibt die Senkung der Ausgaben durch die Zuwendung selbst außer Betracht.

Weitere Informationen stellt das Bayerische Staatsministerium des Innern, für Sport und Integration unter folgender Internetpräsenz zur Verfügung: <https://www.bayernportal.de/dokumente/leistung/000639362589?localize=false>

9.6.2 Energieförderung

Soweit die Maßnahmen zur Klärschlammverwertung Teil eines kommunalen Energiekonzepts oder Energienutzungsplans sind, ist eine Förderung durch das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie möglich. Für kommunale Gebietskörperschaften sind die nachfolgenden Konzeptarten förderfähig:

- kommunale und interkommunale Energienutzungspläne
- Umsetzungsbegleitung eines Energienutzungsplanes
- Folgeenergienutzungsplan
- kommunale Energiekonzepte

Weitere Informationen finden sich unter: <https://www.enponline.de/foerderprogramm/ueberblick/>.

9.6.3 Umweltinnovationsprogramm

Herausforderungen im Umweltschutz sind ein stetiger und wirksamer Treiber für Innovationen. Der Einsatz neuer fortschrittlicher Technologien, die Beiträge zum Erreichen von Umweltschutzziele und zur nachhaltigen Entwicklung leisten, kann Unternehmen in Deutschland gleichzeitig wichtige Chancen eröffnen, ihre Wettbewerbsfähigkeit zu steigern. Gerade bei der erstmaligen Überführung von Umweltschutzinnovationen aus der Phase der Forschung und Entwicklung in die praktische Anwendung bestehen im Vergleich zur Anwendung bereits bewährter Verfahren nicht zu vernachlässigende Kostennachteile sowie technische und wirtschaftliche Risiken.

Das Umweltinnovationsprogramm greift diese Erkenntnisse konsequent auf und zielt auf die Zusammenführung von Innovationsstärkung und Umweltschutzpolitik auch bei kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) ab. Das Programm soll zur Erreichung von Zielen der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen insbesondere in den Bereichen Industrie, Innovation und Infrastruktur (Sustainable Development Goal 9 [SDG 9]), nachhaltiger Konsum und Produktion (SDG 12) und Klimaschutz (SDG 13) beitragen. Die jeweiligen Beiträge zu den Nachhaltigkeitszielen werden erfasst (SDG-Mapping) und als prüfbare Indikatoren in die Erfolgskontrolle des Förderprogramms einfließen. Mit der Umsetzung der innovativen Vorhaben soll direkt ein wesentlicher Beitrag zur Verminderung von Umweltbelastungen geleistet sowie die Reduktion von Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) begünstigt werden. Die geförderten Vorhaben sollen demonstrieren, dass eine Investition in ein die Umwelt entlastendes Verfahren sowohl ökologisch als auch ökonomisch erfolgreich sein kann. Die Vorhaben sollen zur Nachahmung anregen und somit eine Verbreitung der Innovationen unterstützen. Die angestrebte Multiplikatorwirkung wird regelmäßig durch entsprechende fokussierte Evaluierungen überprüft und bewertet.

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) fördert nach Maßgabe dieser Richtlinie investive Demonstrationsvorhaben, die erstmalig in Deutschland in großtechnischem Maßstab aufzeigen, wie innovative Verfahren oder Verfahrenskombinationen nach Abschluss von Forschung und Entwicklung zur Vermeidung und Verminderung von Umweltbelastungen angewandt werden können.

9.6.4 Infrakredit Kommunal

Die LfA Förderbank Bayern gewährt in Zusammenarbeit mit der KfW Bankengruppe Darlehen für kommunale Infrastrukturinvestitionen. Sie bekommen den Infrakredit Kommunal für bauliche sowie sonstige investive Maßnahmen in folgenden Bereichen:

Verkehrsinfrastruktur (einschließlich Öffentlicher Personennahverkehr), Ver- und Entsorgung (einschließlich Wasserversorgung und Abwasserentsorgung), Erschließung von Gewerbe- und Industrieflächen, einschließlich Aufwendungen für Grunderwerb (nur nicht umlagefähige Kosten), allgemeine Energieeinsparung und Umstellung auf umweltfreundliche Energieträger, soweit diese nicht im Infrakredit Energie förderfähig sind, touristische Infrastruktur und Wissenschaft, Technik, Kulturpflege.

Sie erhalten die Förderung als zinsverbilligtes Darlehen.

Der Finanzierungsanteil beträgt bei Kreditbeträgen ab 2 Millionen € bis zu 50 Prozent, unter 2 Millionen € bis zu 100 Prozent der förderfähigen Investitionskosten je Vorhaben.

Bitte beachten Sie: Der Kredithöchstbetrag beträgt pro Kalenderjahr und Antragstellerin und Antragsteller 150 Millionen €. Auf diesen Höchstbetrag sind Darlehenszusagen anzurechnen, die Sie im gleichen Kalenderjahr im IKK – Investitionskredit Kommunen der KfW (einschließlich der aus diesem refinanzierten Darlehen) erhalten haben.

9.6.5 Förderung nach „RIZ“

Eine Förderung interkommunaler Projekte ist im Rahmen der Richtlinie des Bayerischen Staatsministeriums des Innern, für Sport und Integration vom 3.12.2018 für Zuwendungen des Freistaates Bayern zur Förderung der interkommunalen Zusammenarbeit, abgekürzt „RIZ“, (AII/MBI. S. 1231) möglich. Gefördert werden neue und vorbildhafte Projekte in interkommunaler Zusammenarbeit, soweit die im KommZG vorgesehenen oder sonstigen öffentlich-rechtlichen Rechtsformen gewählt werden. Antragsberechtigt sind alle bayerischen kommunalen Gebietskörperschaften und deren Zusammenschlüsse in der Rechtsform einer juristischen Person des öffentlichen Rechts sowie die von ihnen geführten Unternehmen und Einrichtungen. Die Zuwendung wird im Wege der Projektförderung als Festbetragsfinanzierung gewährt. Als Regelzuwendung für die Durchführung eines entsprechenden Kooperationsprojekts wird eine Zuweisung in Höhe von 50.000 € gewährt, jedoch maximal 85 % der zuwendungsfähigen Ausgaben, die unter Beachtung des Wirtschaftlichkeitsprinzips anfallen. Eine erhöhte Zuwendung mit bis zu 90.000 € können Kooperationsprojekte in Teilräumen mit besonderem Handlungsbedarf entsprechend dem Landesentwicklungsprogramm erhalten. Eine Förderung nach dieser Richtlinie entfällt allerdings, wenn für das Kooperationsprojekt andere Mittel des Freistaates Bayern in Anspruch genommen werden. Bewilligungsstelle ist die jeweils zuständige Regierung. Weitere Informationen hierzu können unter <http://www.stmi.bayern.de/kub/komzusammenarbeit> abgerufen werden.

9.6.6 Kommunalrichtlinie

Über das Förderangebot Bayerns hinaus hat das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) für kommunale Trinkwasser- und Abwasseranlagen mit der neu gefassten Richtlinie zur Förderung von Klimaschutzprojekten im kommunalen Umfeld „Kommunalrichtlinie“ neue Fördermöglichkeiten zur Umsetzung von Klimaschutzzielen geschaffen. Dieses Programm läuft aktuell bis zum 31.12.2027. Antragsberechtigt sind insbesondere Kommunen, kommunale Unternehmen

sowie öffentlich-rechtlich organisierte Wasserwirtschaftsverbände. Alle Antragsberechtigten finden sich unter Nummer 5.1 der Kommunalrichtlinie. Das BMU stellt unter der Seite <https://www.klimaschutz.de/de/foerderung/kommunalrichtlinie> einen Förderlotsen und alle Antragsformulare zur Verfügung.

Über die Kommunalrichtlinie werden durch den Bund Maßnahmen zur klimafreundlichen Abwasserbewirtschaftung mit 30 Prozent gefördert. Konkret werden folgende Maßnahmen unterstützt:

- Klärschlammverwertung im Verbund
- Errichtung einer Vorklärung und Umstellung der Klärschlammbehandlung auf Faulung
- Einsatz effizienter Querschnittstechnologien
- Umstellung auf Schlamm Trocknung mit erneuerbaren Energien
- emissionsfreie Lagerung von Faulschlamm
- Anwendung innovativer Verfahrenstechnik
- Reduzierung von Stickstoffemissionen bei der Faulschlammbehandlung
- Erhöhung der Faulgasmenge

Anhang: Erhebungsbogen

Erfassung der Kläranlagen- und Klärschlammdaten

Kläranlage _____	
Betreiber _____	
Ausbaugröße (EW) _____	mittlere Belastung (EW) _____
Abstand der Kläranlage zur nächsten Bebauung (m) _____	
Phosphorelimination ja ☐ nein ☐	falls ja: chemisch ☐ biologisch ☐
Phosphorgehalt (% TR) _____	
Schlammstabilisierung aerob ☐ anaerob ☐	
Klärschlammmenge (m³/a) _____	Trockenrückstandsgehalt (% TR) _____
Schlammbehandlungseinrichtungen	
Faulturm ja ☐ nein ☐	Schlammstapelbecken (SSB) ja ☐ nein ☐
Füllmenge gesamt (m³) _____	Füllmenge gesamt (m³) _____
davon in Gebrauch (m³) _____	davon in Gebrauch (m³) _____
	Unterteilung des SSB (Anzahl der Kammern) _____
Entwässerungsaggregat ja ☐ nein ☐	Schlammwasserspeicherung ja ☐ nein ☐
Art _____	Füllmenge gesamt (m³) _____
Fabrikat _____	davon in Gebrauch (m³) _____
Leistung (m³/h) _____	
Momentane Laufzeit (ca. h/a) _____	
Mobile Entwässerung ja ☐ nein ☐	Aufstellflächen für weitere
Unternehmer _____	Behandlungsaggregate vorhanden ja ☐ nein ☐
Entwässerungsaggregat _____	Entwässerungsaggregat (m²) _____
Entwässerungsgrad (% TR) _____	Trocknungsanlage (m²) _____
Annahme von Fremdschlämmen	
ja ☐ nein ☐ geplant ☐	
Behandlungsmöglichkeiten (z. B. Faulung, Entwässerung, Trocknung) _____	
Klärschlammentsorgung	
Abgabe zur Entwässerung und Entsorgung an die Kläranlage _____	
Abgabe an die Trocknungsanlage _____	
Bisherige Entsorgungsart (z. B. landwirtschaftliche Verwertung, Rekultivierung, thermische Behandlung in der Anlage...) _____ Entfernung (km) _____	
anfallende Kosten Klärschlammentsorgung (€/a) _____ bzw. (€/t) _____	
vorhandene Wärme- / Energiequellen für eine Klärschlamm-trocknung / Brüdenentsorgung	
Blockheizkraftwerk ja ☐ nein ☐ ; falls ja: Leistung (kW _{el}) _____ (kW _{therm}) _____	
Faulgas ja ☐ nein ☐ ; falls ja: Menge (m³/a) _____	
Interesse an eigener Trocknungsanlage ja ☐ nein ☐	
Bekannte Wärmequelle im Umfeld _____ kW _{therm} _____	
Brüdenentsorgung im Umfeld ja ☐ nein ☐	Abgasreinigung ja ☐ nein ☐
vorhandener Stromanschluss	
max. Leistung (kW _{el}) _____	

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Entwicklung der Klärschlammentsorgung in Bayern	9
Abb. 2:	Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Bayern	10
Abb. 3:	Thermische Klärschlammbehandlung in Bayern	11
Abb. 4:	Übersicht über die Behandlungs- und Entsorgungswege von Klärschlamm	14
Abb. 5:	Aufbau eines regionalen Klärschlammentsorgungskonzeptes	15
Abb. 6:	Möglichkeiten zur Klärschlammverwertung ab 2029 gemäß Folgeänderungen der AbfKlärV; bis Ende 2031 ist die bodenbezogene Verwertung oder eine Ausnahmegenehmigung der Behörde für Kläranlagen mit einer Ausbaugröße von maximal 100.000 EW möglich.	16
Abb. 7:	Übersicht über in Bayern betriebene einzelne Trocknersysteme	21
Abb. 8:	Trocknerband mit Klärschlamm-Presslingen	22
Abb. 9:	Solarunterstützte Klärschlammtrocknung mit Rechen zur Schlammumwälzung	23
Abb. 10:	Anlagenschema der Wirbelschichtverbrennung der Fa. Zirngibl	30
Abb. 11:	Monatspreise für Rohphosphate und Düngemittel am Weltmarkt	33
Abb. 12:	Phosphorgehalte im Klärschlamm, der der Klärschlammverordnung unterliegt.	34
Abb. 13:	Phosphorströme in Klärschlamm und Tiermehl im Vergleich zum Mineraldünger	34
Abb. 14:	Möglichkeiten einer Phosphorrückgewinnung im Bereich der Abwasserreinigung, aus Klärschlamm und Klärschlammasche	35
Abb. 15:	Verwertungsszenarien zur Klärschlammverwertung und Phosphorrückgewinnung nach Entwässerung des Klärschlammes ab 2029, Darstellung jeweils als aufsummierte Minima und Maxima der Angaben gemäß Tab. 4, jeweils Annahme eines Aschegehalts im Klärschlamm von 45 % TR.	51

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Anzahl und Ausbaugrößen der bayerischen kommunalen Kläranlagen (Stand Juni 2025)	8
Tab. 2:	Bayerische Zementwerke mit Klärschlammverbrennung	28
Tab. 3:	Technische Konzeptionen von Monoverbrennungsanlagen in Bayern.	29
Tab. 4:	Schätzung zu Entsorgungskosten für verschiedene Stufen und Varianten der Klärschlammverwertung ab 2029 von mech. entwässertem Klärschlamm (25 % TM).	50

Literaturverzeichnis

Adam et al. (2007): Thermal Treatment of Municipal Sewage Sludge Aiming at Marketable P-Fertilisers. Adam, C. Kley, G.; Simon, F.-G. In: Mater. Trans. 48, 12, DOI: 10.2320/matertrans.MK200707. S. 3056–3061.

Adam et al. (2009): Thermochemical treatment of sewage sludge ashes for phosphorus recovery. Adam, C. Peplinski, B. Michaelis, M. Kley, G.; Simon, F.-G. In: Waste management (New York, N.Y.), 29, 3, DOI: 10.1016/j.wasman.2008.09.011. S. 1122–1128.

Adam (2014): Monitoring von Klärschlammonverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik. Umweltbundesamt [Hrsg.]. Adam, C. Texte, 49. 2014. Dessau-Roßlau.

BayWG, 2021: Bayerisches Wassergesetz. BayWG, i. d. F. vom 2021. Landtag des Freistaates Bayern, Fundstelle: GVBl. S. 66, 130, BayRS 753-1-U.

Bertau et al. (2017): Statuspapier Phosphatrückgewinnung. Statuspapier der ProcessNet-Fachgruppe „Rohstoffe“. Bertau, Martin; Fröhlich, Peter; Gellermann, Carsten; Maurer, Alexander; Vohrer, Uwe; Wendler, Katja. 2017. Frankfurt am Main.

BMEL (2023): Biokohle in der Pflanzenproduktion – Nutzen, Grenzen und Zielkonflikte. Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz [Hrsg.]. 2023. Bonn.

Boeckh (2024): In Kreisläufen gedacht. Phosphorrückgewinnung in Mannheim. Boeckh, M. In: Circular Economy, 43, 2. S. 94–95.

DPP (25.07.2023): DPP – Stellungnahme zum Phosphaterzvorkommen in Norwegen. Frankfurt am Main, Knickel, Tabea, info@deutsche-phosphor-plattform.de.

DPP (2024): Informationen. Deutsche Phosphor Plattform (DPP) (26.08.2024). online verfügbar unter www.deutsche-phosphor-plattform.de/information/phosphor/.

DWA (2013): Maschinelle Schlammentwässerung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA). [Stand:] Februar 2013. DWA Dt. Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. DWA-Regelwerk Merkblatt DWA-M, 366. 2013. Hennef. 49 S.

DWA (2019): Kennwerte der Klärschlammentwässerung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA). 1. Auflage. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall. DWA-Regelwerk, M 383. 2019. Hennef. 70 S.

DWA (2021): Klärschlamm-trocknung. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA). 1. Auflage. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall e.V. DWA-Regelwerk, M 379. 2021. Hennef, Deutschland. 98 S.

DWA (2024): 36. Leistungsnachweis kommunaler Kläranlagen. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall [Hrsg.]. 2024. Hennef.

GIRL, 2209: Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen (Geruchsimmissions-Richtlinie). GIRL, i. d. F. vom 2209. Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Fundstelle: V-3-8851.4.4.

GO, 2024: Gemeindeordnung für den Freistaat Bayern. GO, i. d. F. vom 2024, Fundstelle: GVBl. S. 796, 797, BayRS 2020-1-1-I.

GWB, 2024: Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen. GWB, i. d. F. vom 2024, Fundstelle: BGBl. I S. 1750, 3245.

- KommZG, 1994: Gesetz über die kommunale Zusammenarbeit. KommZG, i. d. F. vom 20.06.1994, Fundstelle: GVBl. S. 555; 1995 S. 98.
- Haemig (2024): Lagerung von Klärschlammaschen - eine teure Notlösung? Haemig, H. In: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker und Stefan Kopp-Assenmacher (Hg.): Verwertung von Klärschlamm, Band 7. Bd. 7. 2024. Nietwerder. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. S. 40–48.
- Hager et al. (2020): Entwicklung eines effizienten P-Recycling-verfahrens mit Schwermetallabtrennung. Abschlussbericht über ein FuE-Projekt unter dem Aktenzeichen AZ: 34867/01. 2020.
- HGB, 2024: Handelsgesetzbuch. HGB, i. d. F. vom 11.04.2024, Fundstelle: BGBl Teil III, FNA 4100-1.
- Heidecke, Six (2024): Aktueller Stand der Klärschlammverbrennungskapazitäten in Deutschland. Bestand – Planungen – erwartete Kapazität 2029. Heidecke, P.; Six, J. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall, 71, 10. S. 776–791.
- Heindl, Ritterbusch (2024): VDI-Spezialtag: Trocknung von Klärschlamm. Heindl, A.; Ritterbusch, S. 10.09.2024. VDI, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen. Wolfsburg.
- Herzel et al. (2016): Sewage sludge ash--A promising secondary phosphorus source for fertilizer production. Herzel, H. Krüger, O. Hermann, L.; Adam, C. In: The Science of the total environment, 542, Pt B, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2015.08.059. S. 1136–1143.
- Herzel et al. (2018): Herstellung neuer Düngemittelausgangsstoffe durch thermochemische Behandlung von Klärschlammaschen. Herzel, H. Kugler, S. Anton, Schaaf, T.; Adam, C. In: Verwertung von Klärschlamm. 2018. Neuruppin. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH (1). S. 495–511.
- Herzel et al. (2022): Comparison of thermochemical treatment of sewage sludge ash with sodium sulphate in laboratory-scale and pilot-scale experiments. Herzel, H. Stemann, J. Simon, S.; Adam, C. In: Int. J. Environ. Sci. Technol. 19, 3, DOI: 10.1007/s13762-021-03252-y. S. 1997–2006.
- Holm et al. 2019: Verwertung von Klärschlamm, Band 2. Holm, Olaf; Thomé-Kozmiensky, Elisabeth; Quicker, Peter; Kopp-Assenmacher, Stefan. 2019. Neuruppin. TK. 455 S.
- Hübner et al. (2011): Analyse und Verteilungsverhalten von perfluorierten Chemikalien und anderen persistenten organischen Spurenstoffen in Klärschlamm und Boden. Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.]. Hübner, G. Gierig, M. Rast, U.; Sengl, M. UmweltSpezial. 2011.
- Jacobi et al. (2022): P-Düngewirksamkeit von Klärschlamm-Rezyklaten. Hessisches Landeslabor [Hrsg.]. Jacobi, F. Löber, J. Koch, D.; Schumann, C. 2022. Kassel.
- KIT (2021): Umweltfreundliche Phosphorrückgewinnung auf Basis des P-RoC-Verfahrens: Phosphorbilanz und Wirtschaftlichkeit. Karlsruher Institut für Technologie [Hrsg.], Karlsruher Institut für Technologie (KIT). 2021. Karlsruhe.
- Könemann et al. (2024): Aktuelle Preise sowie zukünftige Kosten der Klärschlammentsorgung. Könemann, R. Lehrmann, F.; Hochgürtel, H. In: Korrespondenz Abwasser, Abfall, 71, 10. S. 792–796.
- Kraus et al. (2019): Ökobilanzieller Vergleich der P-Rückgewinnung aus dem Abwasserstrom mit der Düngemittelproduktion aus Rohphosphaten unter Einbeziehung von Umweltfolgeschäden und deren Vermeidung. Umweltbundesamt [Hrsg.]. Kraus, F. Zamzow, M. Conzelmann, L. Remy, C. Kleyböcker, A. Seis, W. Mieke, U. Hermann, L. Hermann, R.; Kabbe, C. 2019. Dessau-Roßlau.
- LAGA AG Phosphor (2015): Ressourcenschonung durch Phosphor Rückgewinnung. LAGA AG Phosphor [Hrsg.]. 2015.

- Leers et al. (2024): Untersuchungen zur agronomischen Wirksamkeit des R-Rhenania Phosphats aus der ersten großtechnischen Anlage. Leers, K. Fabian, Herzel, H. Emter, J. Brey, C. Leimkötter, D. Künstler, J. Arnold, U. Burkhardt, J.; Adam, C. In: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Peter Quicker und Stefan Kopp-Assenmacher (Hg.): Verwertung von Klärschlamm, Band 7. Bd. 7. 2024. Nietwerder. Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH. S. 317–326.
- Leidolph, L. Jacob, M.; Böber, R. (2017): Verfahren zur Herstellung von Düngemittelgranulat; Düngemittelgranulat. Patent am 08.08.2017. Anmeldenr: 17001351.0. Veröffentlichungsnr: EP3 293 165B1. C05D9/00.
- Leise (2024): Phosphor-Rückgewinnungsanlage P-Xtract in Breisach in den Regelbetrieb gegangen. Leise, V. In: EUWID Recycling und Entsorgung, 2024, 09.10.2024, 42. S. 8. online verfügbar unter www.euwid-recycling.de/news/wirtschaft/p-rueckgewinnungsanlage-p-xtract-in-breisach-in-den-regelbetrieb-gegangen-091024/.
- Leise (2025): HTC von Klärschlamm hat sich im Kläranlagenbetrieb bewährt. Leise, V. In: EUWID, 7. S. 34.
- LfU (2023): Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen. Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.], UmweltSpezial. 2023. Augsburg.
- Lodwig (2020): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm und Klärschlammasche. Eigenschaften verschiedener Verfahren. 2020. Recklinghausen.
- MVV Umwelt Asset GmbH (2023): Vorl. Wissenschaftlicher Endbericht der Klärschlammbehandlungsanlage DR MK6 (übergeordnet) für das Bauvorhaben Errichtung von thermo-chemischen Klärschlammbehandlungsanlagen (KBA) im HKW Mannheim. 2023.
- Pillen et al. (2023): Struvitdünger und seine Möglichkeiten für den Markteintritt. Institut für sozial-ökologische Forschung GmbH [Hrsg.]. Pillen, J. Götz, K.; Winkler, M. Materialien Soziale Ökologie (MSÖ), 71. 2023. Frankfurt am Main.
- Puntke (2004): Auswirkungen des Phosphateintrages in Drehofenanlagen der Zementindustrie auf Klinkermineralogie und Zementeigenschaften. Puntke, S. Dissertation. 2004. Technische Universität Clausthal. Clausthal. Fakultät für Bergbau, Hüttenwesen und Maschinenwesen.
- Rühle (2023): Betriebskosten entgleisen langsam aber sicher: In der Unkeler Pyreg-Anlage gehen die Lichter aus. Rühle, D. In: Rhein-Zeitung, 07.07.2023. online verfügbar unter www.rhein-zeitung.de/region/aus-den-lokalredaktionen/kreis-neuwied_artikel,-betriebskosten-entgleisen-langsam-aber-sicher-in-der-unkeler-pyreganlage-gehen-die-lichter-aus-_arid,2553122.html.
- Schaum et al. (2020): Phosphorrückgewinnung bei der Abwasserbehandlung. Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt (LfU). Schaum, Christian A.; Hubert, Christian; Steiniger, Bettina; Steinle, Eberhard; Athanasiadis, Konstantinos. Universität der Bundeswehr München Institut für Wasserwesen. Mitteilungen / Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Nr. 130 (2020). 2020. Neubiberg. 52 S.
- Schaum et al. (2023): Untersuchungen zur Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm kleiner und mittlerer Kläranlagen. Abschlussbericht im Auftrag des Bayerischen Landesamtes für Umwelt. Schaum, Christian A.; Chalupczok, Sebastian; Blattenberger, Johannes; Hubert, Christian; Krause, Steffen; Steiniger, Bettina; Athanasiadis, Konstantinos; Egeler, Maria. Universität der Bundeswehr München Institut für Wasserwesen. Mitteilungen / Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Heft 136 (2023). 2023. Neubiberg. 19 S.

Schnell (2023): Integration des additivgestützten thermochemischen Phosphor-Recyclings in die Klärschlammverbrennung. Schnell, Matthias. Shaker Verlag. Schriftenreihe zur Aufbereitung und Veredlung, 89. 2023. Düren.

17. BImSchV, 2024: Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV). 17. BImSchV, i. d. F. vom 13.02.2024. Bundesregierung, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Fundstelle: BGBl. 2024 I Nr. 43.

Spörri et al. (2021): Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung. Bundesamt für Umwelt [Hrsg.]. Spörri, A. O'Connor, I. Hermann, L.; Hermann, R. 2021.

Stemann et al. (2015): Thermochemical treatment of sewage sludge ash with sodium salt additives for phosphorus fertilizer production--Analysis of underlying chemical reactions. Stemann, J. Peplinski, B.; Adam, C. In: Waste management (New York, N.Y.), 45, DOI: 10.1016/j.wasman.2015.07.029. S. 385–390.

Stermann, J. Adam, C.; Ludwig, H. (2014): Herstellung citratlöslicher Phosphate durch Kalzinierung sekundärer Phosphatquellen mit einer Natrium-Schwefel-Verbindung am 11.06.2014. Veröffentlichungsnr: DE 10 2014 108 199 B3.

TA Luft, 2021: Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft. TA Luft, i. d. F. vom 18.08.2021. Bundesregierung, Fundstelle: GMBI 2021 Nr. 48-54, S. 1050.

U.S. Geological Survey (2024): Mineral commodity summaries 2024. U.S. Geological Survey [Hrsg.]. 2024, DOI: 10.3133/mcs2024.

UStG, 2024: Umsatzsteuergesetz. UStG, i. d. F. vom 15.07.2024. Bundestag, Fundstelle: BGBl. I S. 386.

Urbatzka et al. (2023): Einfluss von P Recyclingdüngern auf den Ertrag und P Gehalt von Silomais im ökologischen Landbau. Urbatzka, P. Heuwinkel, H.; Tucher, S. In: H.-P. Kaul und Neugschwandtner, R, Franke-Weltmann, L. (Hg.): Digital tools, big data, modeling and sensing methods for sustainable and climate smart crop and grasslands systems. Bd. 33. 2023. Göttingen. Liddy Halm Medienproduktion & Verlag (Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, 33). S. 57–58.

VDZ (2022): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2021. Verein Deutscher Zementwerke e.V. [Hrsg.]. 2022. Düsseldorf.

DüMV, 2019: Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung). DüMV, i. d. F. vom 02.10.2019. BMEL, Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, Fundstelle: BGBl. I S. 2482.

AbfPV, 2014: Verordnung über den Abfallwirtschaftsplan Bayern. AbfPV, i. d. F. vom 17.12.2014. Bayerische Staatsregierung, Fundstelle: GVBl S. 578.

AbfKlärV, 2017: Verordnung über die Verwertung von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost (Klärschlammverordnung). AbfKlärV, i. d. F. vom 27.09.2017. Bundesregierung, Fundstelle: BGBl. I S. 3465.

Vogel et al. (2024): Per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS) während der Klärschlammverbrennung - Analytische Methoden zur Überwachung. Vogel, C. Herzel, H. Wittwer, P. Leube, P.; Adam, C. In: Olaf Holm, Elisabeth Thomé-Kozmiansky, Peter Quicker und Stefan Kopp-Assenmacher (Hg.): Verwertung von Klärschlamm, Band 7. Bd. 7. 2024. Nietwerder. Thomé-Kozmiansky Verlag GmbH. S. 231–241.

Waldmüller (2023): Energetische und stoffliche Betrachtung der hydrothermalen Carbonisierung von Klärschlamm mit gekoppelter Phosphorrückgewinnung. Waldmüller, W. Dissertation. 2023. Technische Universität München. 275 S.

WHG, 2023: Wasserhaushaltsgesetz. WHG, i. d. F. vom 22.12.2023. Bundestag, Fundstelle: BGBl. I S. 2585.

World Bank (2024): World Bank Commodities Price Data (The Pink Sheet). World Bank [Hrsg.]. 2024. Washington DC.

Zeschmar-Lahl et al. (2020): Abfallmitverbrennung in Zementwerken. Umweltbundesamt [Hrsg.]. Zeschmar-Lahl, B. Schönberger, H.; Waltisberg, J. Texte, 202/2020. 2020. Dessau-Roßlau.



finanziert durch
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

