



Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen

Ein Leitfaden für Kommunen



Auf einen Blick ...

Titel:	Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen Ein Leitfaden für Kommunen
Themenbereich:	Wasser
Stand:	November 2023
Herausgeber:	Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)
Redaktion:	LfU, Referat 67
Ausgabe:	1. Auflage
Shop-Link:	https://www.bestellen.bayern.de/shoplink/lfu_was_00330.htm

Für wen die Publikation interessant ist

Kommunen, Betreiber von Kläranlagen, Planer von Kläranlagen, Wasserwirtschaftsämter

Warum sie relevant ist

- Durch aktuelle rechtliche Änderungen (Klärschlammverordnung, Düngeverordnung) erfolgt eine weitere Abkehr von der bodenbezogenen Klärschlammverwertung hin zur thermischen Klärschlammbehandlung. Damit verbunden ist für viele kleine und mittlere Kläranlagenbetreiber die Notwendigkeit zur Umstellung der Schlammbehandlung auf der Kläranlage.
- Die Publikation gibt einen Überblick über die Technologien zur Schlammbehandlung bei kleinen und mittleren Kläranlagen unter Berücksichtigung der Entsorgungswege und soll bei der Planung zukünftiger Maßnahmen unterstützen. Ein besonderes Augenmerk wird dabei auf die kläranlagenübergreifende Klärschlammbehandlung auch unter Berücksichtigung der interkommunalen Zusammenarbeit gerichtet.
- Praxisbeispiele zeigen, welche Varianten bereits erfolgreich umgesetzt wurden.

Hier gibt es mehr zum Thema ...

- Homepage des LfU Bayern > Wasser > Abwasser > Abwasserbehandlung > Klärschlamm
- Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen Nr. 136 der Universität der Bundeswehr München
<https://athene-forschung.unibw.de/145512>



Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen

Ein Leitfaden für Kommunen

Impressum

Klärschlammbehandlung auf kleinen und mittleren Kläranlagen
Ein Leitfaden 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:

Universität der Bundeswehr München, Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christian Schaum, Dr.-Ing. Sebastian Chalupczok, Johannes Blattenberger, M.Sys.Eng.,
Dr.-Ing. Steinle Ingenieurgesellschaft für Abwassertechnik mbH
Dr.-Ing. Konstantinos Athanasiadis, Maria Egeler, M.Sc.

Redaktion:

LfU, Referat 67

Bildnachweis:

alle Bilder: Universität der Bundeswehr München, Professur für Siedlungswasserwirtschaft und Abfalltechnik, 85577 Neubiberg
außer Abb. 4: LfU

Druck:

Uhl-Media GmbH
Kemptener Straße 36
87730 Bad Grönenbach
11/2023



Stand:

November 2023

Dieses Druckerzeugnis ist mit dem Blauen Engel ausgezeichnet.

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 Wahlwerbem 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	Einführung	4
2	Wege der Klärschlamm Entsorgung	5
3	Kleine und mittlere Kläranlagen in Bayern	8
4	Technologien zur Klärschlammbehandlung	10
4.1	Klärschlamm-Speicherung	10
4.2	Klärschlamm-Entwässerung	11
4.3	Schlammwasserspeicherung	14
4.4	Klärschlamm-Trocknung	15
5	Klärschlammbehandlung bei Abwasserteichanlagen	18
6	Kläranlagenübergreifende Klärschlammbehandlung	19
6.1	Möglichkeiten der Fremdschlammannahme	19
6.2	Verfahrenstechnische Aspekte bei der Fremdschlammannahme	20
6.3	Rechtliche Gestaltung der interkommunalen Zusammenarbeit	21
7	Untersuchungspflichten	23
8	Literaturverzeichnis	25

1 Einführung

Etwa 97 % der bayerischen Bevölkerung sind an die öffentliche Abwasserentsorgung angeschlossen. Zum bestmöglichen Schutz unserer Gewässer wird bei der Reinigung des Abwassers ein hoher fachlicher Standard umgesetzt. Bei der Abwasserreinigung entsteht Klärschlamm, in dem sich die aus dem Abwasser entfernten Stoffe prozessbedingt anreichern. Klärschlamm enthält daher organische und anorganische Schadstoffe wie bestimmte Arzneimittelrückstände, Schwermetalle, Mikroplastik und Krankheitserreger.

Die bayerische Staatsregierung hat sich bereits vor mehr als 20 Jahren das Ziel gesetzt, die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm in Landwirtschaft und Landschaftsbau aus Gründen des vorsorgenden Verbraucher-, Boden- und Gewässerschutzes zu beenden. Klärschlamm soll vielmehr einem Entsorgungsverfahren zugeführt werden, das die organischen Schadstoffe und Keime zerstört. Dies wird durch eine thermische Behandlung (Verbrennung) des Klärschlammes nach der Entwässerung und ggf. Trocknung gewährleistet.

Inzwischen wurde diese Zielsetzung durch die Klärschlammverordnung des Bundes (AbfKlärV) für große Kläranlagen umgesetzt. Ab dem Jahr 2029 ist für Kläranlagen, die auf mehr als 100.000 Einwohnerwerte ausgelegt sind, und ab 2032 für Kläranlagen mit mehr als 50.000 Einwohnerwerten eine bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm nicht mehr erlaubt. Ebenso können bei kleinen und mittleren Kläranlagen Überschreitungen von Grenzwerten aus der AbfKlärV schon jetzt dazu führen, dass eine bodenbezogene Klärschlammverwertung nicht mehr möglich ist.

Zudem tritt ab dem Jahr 2029 für alle Kläranlagen, deren Klärschlamm einen bestimmten Phosphorgehalt überschreitet, eine Pflicht zur Rückgewinnung des wertvollen Rohstoffs Phosphor in Kraft. Damit soll sichergestellt werden, dass der Nährstoff Phosphor in den Verwertungskreislauf zurückgeführt wird. In bestimmten Fällen kann dies auch bei kleinen und mittleren Kläranlagen dazu führen, als Entsorgungsweg für den anfallenden Klärschlamm die Verbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche zu wählen.

Eine Abkehr von der landwirtschaftlichen Verwertung hin zur Verbrennung ist bei der Behandlung des Klärschlammes zu berücksichtigen und bedeutet für viele kleine und mittlere Kläranlagenbetreiber die Notwendigkeit zur Umstellung der Schlammbehandlung auf der Kläranlage.

Die Universität der Bundeswehr München hat im Auftrag des Landesamts für Umwelt Untersuchungen zur Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm kleiner und mittlerer Kläranlagen durchgeführt. Auf dieser Grundlage sind im vorliegenden Leitfaden die relevanten verfahrenstechnischen Aspekte, wie Schlammwasserspeicherung, Klärschlammmentwässerung und -trocknung sowie damit zusammenhängende Fragen dargestellt. Der Leitfaden soll eine Hilfestellung bei der Erstellung geeigneter Konzepte zur Schlammbehandlung geben.

2 Wege der Klärschlamm Entsorgung

Bei der Abwasserbehandlung fällt Klärschlamm an, welcher aus organischen und anorganischen Materialien, zunächst aber vor allem aus Wasser besteht. Der Feststoffgehalt beträgt direkt nach der Abwasserbehandlung ca. 1 % Trockenrückstand (TR), d. h. der Rohschlamm besteht zu 99 % aus Wasser. Der Schlammanfall und die -beschaffenheit hängen von den eingesetzten Verfahren der Abwasserbehandlung und den Betriebsbedingungen ab.



Abb. 1: Anfallender Klärschlamm aus der Abwasserbehandlung

Für die früher noch weit verbreitete landwirtschaftliche Verwertung im Umkreis der Kläranlage war grundsätzlich keine maschinelle Entwässerung des Klärschlamm erforderlich. Der alternative Weg über externe Anlagen zur Trocknung und Verbrennung erfordert jedoch eine entsprechende Vorbehandlung zur Volumenreduktion (siehe Kapitel 4.2), um den Aufwand und die Kosten für den Transport gering zu halten und die Abnahmekriterien des Entsorgers bzw. Verwerters zu erfüllen. Eine maschinelle Entwässerung kann auf der eigenen Kläranlage entweder mit einer mobilen Anlage eines externen Dienstleisters oder mit einer eigenen stationären Anlage durchgeführt werden. Alternativ kann der unbehandelte Schlamm – ggf. im Rahmen einer interkommunalen Zusammenarbeit (siehe Kapitel 6) – zu einer geeigneten Nachbarkläranlage transportiert werden, die dann die erforderliche Vorbehandlung und den weiteren Entsorgungsweg übernimmt.



Abb. 2: Klärschlamm nach Entwässerung

Begriffe und Einheiten bei der Klärschlammbehandlung

Einwohnerwert (EW)	Summe aus Einwohnerzahl und Einwohnerequivalent (Vergleichswert zur Umrechnung von Verschmutzungen aus nicht häuslichem Abwasser), Einheit E (DIN EN 16323)
Größenklasse (GK)	Nach Abwasserverordnung (AbwV) werden Kläranlagen in fünf Größenklassen unterteilt: <ul style="list-style-type: none">• < 1.000 EW (GK 1)• 1.000 bis 5.000 (GK 2)• 5.001 bis 10.000 (GK 3)• 10.001 bis 100.000 (GK 4)• > 100.000 (GK 5)
Trockenmasse (TM)	Nach Trocknung der Originalprobe verbleibende Masse, die in der Originalprobe gelöste, nicht flüchtige Stoffe enthält, Einheit: g TM (DWA-M 383 2019)
Trockenrückstand (TR)	Anteil, der nach dem Verdampfen des Wassers verbleibenden partikulären und gelösten Stoffe an der Masse der Ausgangsprobe, Einheit: % (DWA-M 383 2019)
Glühverlust (GV)	Anteil der organischen Feststoffe in den Feststoffen, Einheit: % (DWA-M 383 2019)

Abb. 3 gibt einen Überblick über die möglichen Entsorgungswege für Klärschlamm bei kleinen und mittleren Kläranlagen und die damit verbundene Klärschlammbehandlung. Möchte beispielsweise eine kleine Kläranlage den Klärschlamm mobil entwässern, kommen die Entsorgungsmöglichkeiten B (Landwirtschaft), C (Landschaftsbau/Rekultivierung) oder D (thermische Behandlung) in Frage. Die relevanten Entscheidungskriterien sind im unteren Teil der Abbildung aufgeführt.

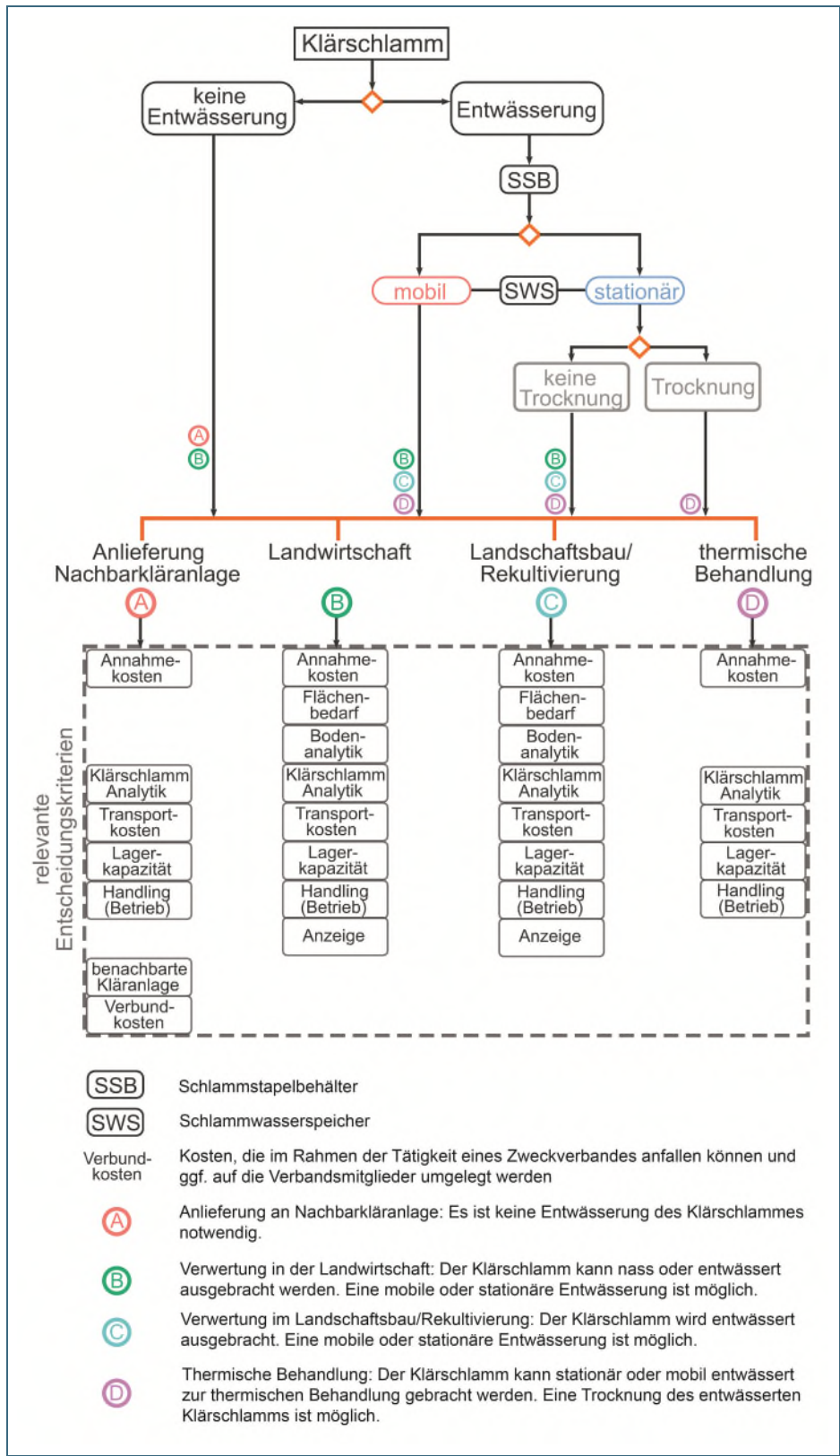


Abb. 3: Erforderliche Klärschlammbehandlung unter Berücksichtigung der Entsorgungswege

Auf Abwasserbehandlungsanlagen kommt es zu Treibhausgasemissionen, die im Zusammenhang mit dem Klimawandel relevant sind. Beim Umgang mit Klärschlamm sind vor allem mögliche Emissionen von Methan zu berücksichtigen (siehe Kapitel 4.1). Auch die Transportwege beeinflussen die Klimabilanz.

3 Kleine und mittlere Kläranlagen in Bayern

In Bayern findet sich eine Vielzahl von kleinen ländlichen Kläranlagen, die deutlich mehr als die Hälfte der derzeit etwa 2.400 kommunalen Kläranlagen ausmachen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2021).

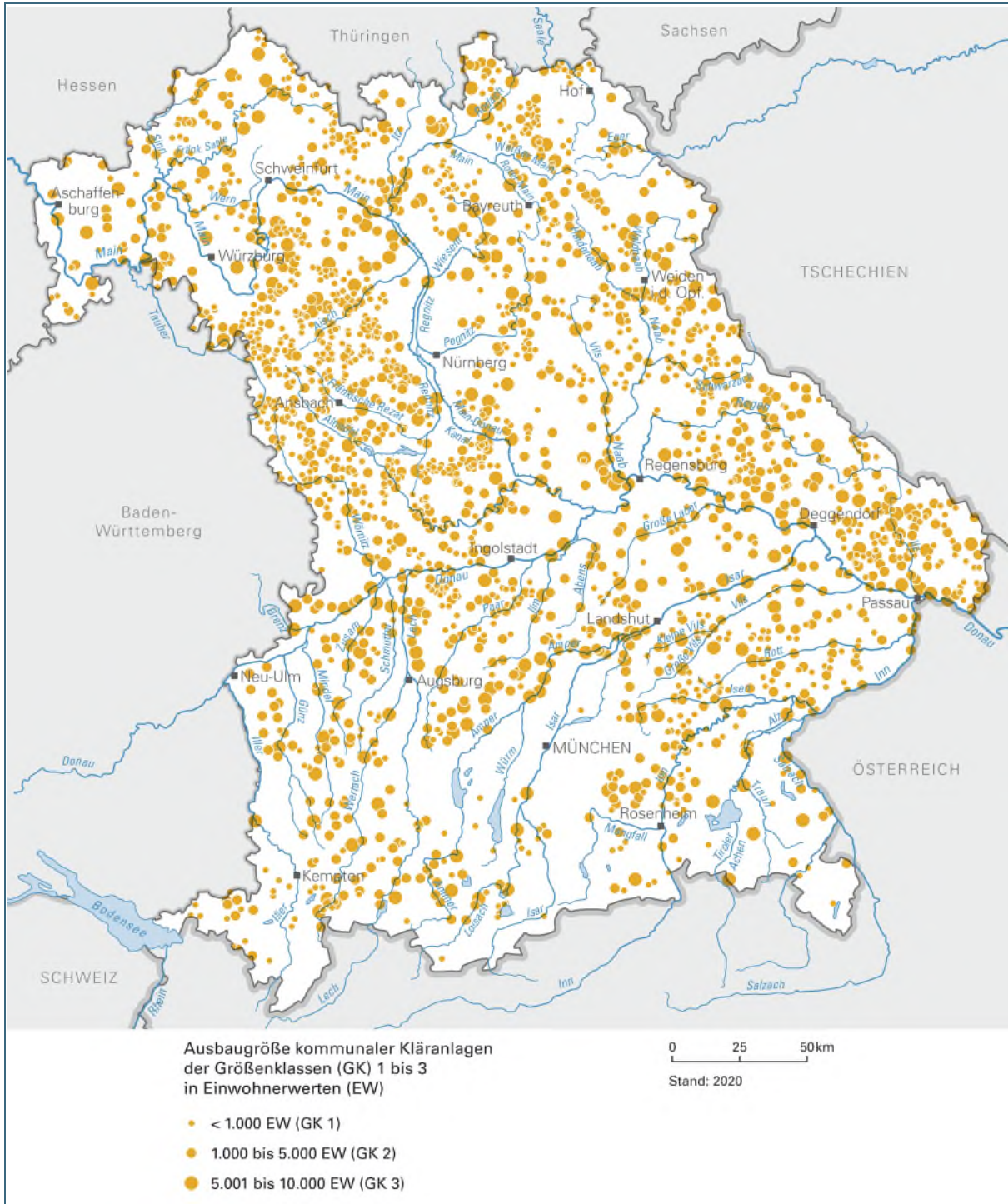


Abb. 4: Verteilung der Kläranlagen der Größenklassen 1–3 in Bayern

Kläranlagen der Größenklasse (GK) 1 werden in Bayern zu etwa 50 % als unbelüftete Abwasserteichanlagen betrieben. Daneben gibt es belüftete Abwasserteichanlagen, Abwasserteichanlagen mit technischer Zwischenstufe und Belebungsanlagen.

Kläranlagen der GK 2 behandeln die anfallenden Abwässer überwiegend mittels Belebungsverfahren mit gemeinsamer Schlammstabilisierung (ca. 50 %), welche auch bei Abwasserbehandlungsanlagen der GK 3 den größten Anteil ausmachen (ca. 70 %).

Diese Belebungsanlagen mit gemeinsamer aerober Schlammstabilisierung werden mit einem hohen Schlammalter von > 25 Tagen betrieben. Der Überschussschlamm enthält daher einen vergleichsweise geringen Anteil an abbaubaren organischen Stoffen. Er wird regelmäßig abgezogen und in Schlammstapelbehältern gespeichert sowie teilweise eingedickt. Dieser Pufferbehälter dient als Vorlage für die anschließende Entwässerung, bei der mittels mobiler oder stationärer Anlagen der Feststoffgehalt durch das Abtrennen von Wasser erhöht und damit Volumen und Gewicht reduziert werden (siehe Kapitel 4).

Kleinkläranlagen, kleine und mittlere Kläranlagen

- Definitionsgemäß sind Kleinkläranlagen Abwasserbehandlungsanlagen, die getrennt erfasstes häusliches Schmutzwasser bis max. 50 EW behandeln (GK 1).
- In diesem Leitfaden werden Kläranlagen von 50 bis 5.000 EW (GK 1 und 2) als kleine Kläranlagen bezeichnet.
- Kläranlagen zwischen 5.001 und 10.000 (GK 3) werden in diesem Leitfaden als mittlere Kläranlagen eingestuft.

Bei Abwasserteichanlagen wird der meist in größeren zeitlichen Abständen anfallende Klärschlamm nach ausreichender Lagerdauer oft noch landwirtschaftlich verwertet, sofern er nicht zu anderen Kläranlagen transportiert wird. Eine maschinelle Entwässerung des Klärschlammes ist die Ausnahme (siehe Kapitel 5).

Begriffe bei der Abwasserbehandlung

Belebtschlammverfahren	Biologisches Verfahren, bei dem Abwasser sowie der Belebtschlamm belüftet, durchmischt und anschließend einer Nachklärung zugeführt werden
Belebtschlammflocke	Durch den Belebungsprozess (Belüftung) auftretende Flockenstruktur des Schlammes bei der Abwasserbehandlung
Schlammalter	Mittlere Aufenthaltszeit der Belebtschlammflocke im Belebungsbecken
Simultan aerobe Stabilisierung	Belebungsverfahren, bei dem durch eine lange Belüftungszeit organische Stoffe abgebaut werden und der Klärschlamm aerob stabilisiert wird

4 Technologien zur Klärschlammbehandlung

4.1 Klärschlammspeicherung

Schlammstapelbehälter dienen der Zwischenspeicherung und ggf. Eindickung des Rohschlammes vor einer weiteren Behandlung oder Entsorgung (insbesondere für die mobile Entwässerung mit anschließender Entsorgung oder dem Ausbringen des Nassschlammes in die Landwirtschaft).

Die erforderliche Größe der Schlammstapelbehälter hängt vom Klärschlammanfall und der weiteren Behandlung oder Entsorgung ab. Durch die Größe der Schlammstapelbehälter wird der zeitliche Abstand zwischen zwei Entwässerungen begrenzt. Bei der landwirtschaftlichen Verwertung empfiehlt sich eine Speicherkapazität von sechs bis zwölf Monaten, bei der thermischen Verwertung von drei bis sechs Monaten.



Abb. 5: Schlammstapelbehälter zur Zwischenspeicherung und ersten Eindickung von anfallendem Klärschlamm

Schlammstapelbehälter sind potenzielle Quellen für klimarelevante Methanemissionen, die durch mechanische Behandlung des Klärschlammes freigesetzt werden können (beispielsweise durch Rühren, Entwässern, Transport). Lange Lagerzeiten begünstigen die Bildung von Treibhausgasemissionen (u. a. Methan) und erhöhen die Rückbelastung im Schlammwasser.

Entsorgungs- und Betriebssicherheit oder Kosteneinsparung?

- Ohne geeignete Speicherkapazitäten muss ein höherer logistischer Aufwand berücksichtigt werden, da sich kurze Intervalle zwischen den Entwässerungen ergeben.
- Bei Einsatz von mobilen Lohnentwässerungsunternehmen können kurz- bis langfristige Unterbrechungen der Entwässerung aufgrund der Transportlogistik sowie dem Ausfall des Entsorgers auftreten.
- Größere Speicherkapazitäten erhöhen die Entsorgungs- und Betriebssicherheit, verursachen jedoch einen entsprechenden Kostenaufwand.
- Bei der Bemessung der Klärschlamm lagerkapazitäten sind saisonale Einflüsse (z. B. Zufahrtsmöglichkeiten bei verschiedenen Witterungsbedingungen) zu berücksichtigen.



Abb. 6: Schlammstapel- und Schlammwasserbehälter steigern die Entsorgungssicherheit und Betriebsstabilität



Abb. 7: Blick in einen teilgefüllten Schlammstapelbehälter

4.2 Klärschlammmentwässerung

Grundlagen

Ziel der Klärschlammmentwässerung ist die Volumenreduktion und damit die Steigerung des Trockenrückstands (TR).

Bereits durch die Eindickung im Schlammstapelbehälter lässt sich ein TR-Anteil von etwa 2,5 % erreichen. Durch die maschinelle Entwässerung werden TR-Gehalte von 20 bis 35 % erreicht. Die erzielbaren TR-Gehalte sind abhängig von der Klärschlammart, -qualität und dem eingesetzten Entwässerungssystem einschließlich der verwendeten Hilfs- und Zusatzstoffe (Konditionierungsmittel). Dafür kommen überwiegend organische polymere Flockungsmittel zum Einsatz, welche die Agglomeration der Schlammflocken unterstützen. Für ihre Aufbereitung wird zusätzlich zum eigentlichen Entwässerungsaggregat eine Ansetzstation vor Ort benötigt, die bei einer mobilen Entwässerung vom externen Dienstleister gestellt werden kann.

Zur Klärschlammmentwässerung stehen verschiedene Technologien zur Verfügung, die sich z. B. hinsichtlich der Durchsatzraten und des Bedarfs für Strom und Konditionierungsmittel unterscheiden:

- Zentrifuge Entwässerung durch Nutzung der Massenträgheit
- Kammerfilterpresse Chargenweise Entwässerung durch Filtration in Kammern
- Bandfilterpresse Entwässerung zwischen zwei Filterbändern unter steigendem Druck
- Schneckenpresse Entwässerung durch eine konische Schneckenwelle



Abb. 8: Klärschlammmentwässerung durch Schnecken- ... und Kammerfilterpresse-
presse...

Stationäre oder mobile Klärschlammmentwässerung

Bei der mobilen Entwässerung kommen in der Regel Zentrifugen, Band- oder Kammerfilterpressen zum Einsatz, wobei die Größe der mobilen Entwässerungsaggregate von Transportabmessungen und dem zulässigen Gesamtgewicht gemäß der Straßenverkehrs-Zulassungs-Ordnung (StVZO) begrenzt ist. Entsprechend können bei mobilen Zentrifugen Durchsatzmengen von 15 bis 70 m³/h erzielt werden, bei stationären Zentrifugen sind bis zu 200 m³/h möglich.

Als wesentliche Entscheidungsgrundlage (mobil oder stationär) sollte eine Kostenvergleichsrechnung dienen. Hohe Investitionskosten können sich ggf. infolge geringerer Betriebskosten schon nach kurzer Zeit amortisieren. Daneben sollten die Vor- und Nachteile einer stationären Entwässerung sorgfältig abgewogen werden (siehe Tabelle 1). Ab etwa 10.000 € können die Vorteile einer stationären Anlage überwiegen, darunter wird in vielen Fällen eine mobile Lösung günstiger sein (Stand 2022).

Grundsätzlich empfiehlt es sich, in einem ersten Schritt eine Grundlagenermittlung anhand einer Checkliste durchzuführen. Dabei sollte insbesondere geklärt werden,

- welche Mengen an Klärschlamm jährlich und mit welcher Qualität anfallen,
- ob die für eine mobile Entwässerung erforderlichen Anlagen- bzw. Umgangsflächen mit befestigtem Untergrund zur Verfügung gestellt werden können,
- ob ein Strom- und Wasseranschluss für die mobile Entwässerung vorliegen und
- welche Lagerkapazitäten (Schlammstapel-, Schlammwasserbehälter, entwässerter Klärschlamm) erforderlich sind und realisiert werden können.



Abb. 9: Klärschlamm aus der Entwässerung mit einer mobilen Kammerfilterpresse

Tabelle 1: Vor- und Nachteile einer mobilen und stationären Entwässerung

	Vorteile	Nachteile
Mobil	<ul style="list-style-type: none"> • Geringerer Betriebs- und Personalaufwand • Keine Investitionen in Maschinenteknik • Ggf. kalkulierbare Jahreskosten 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Preisabhängigkeit • Ein Prozesswasserspeicher und ein größeres Schlammstapelvolumen sind notwendig • Ggf. schlechteres Entwässerungsergebnis • Abhängigkeit von saisonalen Einflüssen (Witterungsbedingungen)
Stationär	<ul style="list-style-type: none"> • Geringeres notwendiges Volumen für Schlammstapel- und Schlammwasserbehälter • Individuelle Schlammwasserrückführung (geringere Rückbelastung) und ggf. Verzicht auf Prozesswasserspeicher möglich • Bessere Planbarkeit und damit höhere Entsorgungssicherheit • Preisunabhängigkeit (Energie- und Rohstoffpreise) • Höhere Flexibilität • Optimiertes Entwässerungsergebnis • Unabhängig von saisonalen Einflüssen (Witterungsbedingungen) 	<ul style="list-style-type: none"> • Höherer Personalaufwand (Betrieb, Wartung) • Höhere Investitions-, Wartungs- und Betriebskosten • Flächenbedarf für Entwässerungsaggregat und Lagerflächen für entwässerten Klärschlamm • Höherer organisatorischer Aufwand (Beschaffung von Polymeren, Klärschlamm Entsorgung)

Beispiel Kläranlage Ippesheim (5.500 EW)

Eine stationäre Entwässerung kann auch bei geringeren Klärschlammmengen sinnvoll sein. Dies zeigt das Beispiel der Kläranlage Ippesheim (Mittelfranken), bei der die Klärschlammmentwässerung auf die spezifischen Eigenschaften des eigenen Klärschlammes angepasst wurde. Der dortige Klärschlamm verfügt über einen hohen Lehmanteil in der Belebtschlammflocke, was sich in einem hohem TR-Gehalt und einem geringen Glühverlust widerspiegelt.

Beispiel Kläranlage Balderschwang (2.200 EW)

Eine stationäre Entwässerung kann kosteneffizienter sein, wenn Zufahrtsmöglichkeiten für eine mobile Schlammmentwässerung saisonal stark eingeschränkt sind. Dies ist beispielsweise bei der Kläranlage Balderschwang in der Alpenregion der Fall. Hier wurde eine stationäre Entwässerung gewählt, da in den Wintermonaten, teilweise über ein halbes Jahr, Zufahrtsmöglichkeiten für eine mobile Entwässerung erheblich eingeschränkt sind und die Speichermöglichkeiten des Überschussschlammes für so einen langen Zeitraum nicht gegeben sind.

4.3 Schlammwasserspeicherung

Bei der Entwässerung von Klärschlamm fällt Schlammwasser an, welches in die Abwasserbehandlung zurückgeführt wird. Die damit verbundene hohe Rückbelastung kann erheblichen Einfluss auf die biologische Stufe der Abwasserbehandlung haben und ist bei der Auslegung und dem Betrieb der Kläranlagen zu berücksichtigen (insbesondere hinsichtlich der Stickstoff-Elimination). Wird zu viel Schlammwasser in kurzer Zeit zurückgeführt, kann die Kläranlage überlastet werden und es zu einer Überschreitung der Grenzwerte im Ablauf kommen.

Schlammwasserspeicher bieten die Möglichkeit zur Zwischenspeicherung des Schlammwassers und der kontrollierten Rückführung in den Hauptstrom der Kläranlage ohne die Abwasserbehandlung zu überlasten. Die Kapazität des Schlammstapelbehälters und des Schlammwasserspeichers müssen aufeinander abgestimmt sein und auch die Entwässerungsdauer berücksichtigen (bei der mobilen Entwässerung oft nur wenige Tage).



Abb. 10: Schlammwasserbehälter nach der Entwässerung

Wird eine stationäre Entwässerung kontinuierlich betrieben, erfolgt auch die Rückbelastung kontinuierlich. Die Größe des Schlammwasserspeichers kann hier im Vergleich zur mobilen Lösung deutlich reduziert werden.

Entwässerung und Schlammwasserrückbelastung aus der Praxis

- Untersuchungen von Schlammwasser an 15 bayerischen Kläranlagen haben gezeigt, dass Ammonium-Stickstoff den wesentlichen Anteil der Rückbelastung ausmacht.
- Die Konzentrationen von Nitrat- und Nitrit-Stickstoff im Schlammwasser sind vernachlässigbar gering.
- Bezogen auf die spezifische Stickstofffracht im Zulauf der Kläranlage beträgt der Anteil der Stickstofffracht aus der Klärschlamm-Entwässerung rd. 2 bis 9 %, im Mittel 4 % (gilt nur für eine kontinuierliche Rückführung, z. B. kontinuierliche Entwässerung oder Schlammwasserbewirtschaftung mittels Speicherbehälter).
- Bei langen Aufenthaltszeiten im Schlammstapelbehälter stellen sich schnell anaerobe Bedingungen ein, die bei der Entwässerung zu deutlich höheren Ammonium-Stickstoff-Rückbelastungen und zu klimarelevanten Methanemissionen führen können. Je länger die Lagerdauer, desto höher ist die Ammoniumkonzentration im Schlammwasser.

4.4 Klärschlamm-trocknung

Eine Trocknung des Klärschlammes führt zu einer weiteren Erhöhung des TR-Gehalts und damit zu geringeren Transport- und Entsorgungskosten. Abhängig vom erreichten TR-Gehalt wird von einer Teil- oder Volltrocknung gesprochen. Mit der Volltrocknung wird ein biologisch stabiles Endprodukt erreicht.

Teil- und Volltrocknung

Teiltrocknung: erzielter TR-Gehalt zwischen 40 und 90 %

Volltrocknung: erzielter TR-Gehalt \geq 90 %

In der Broschüre „Klärschlamm-entsorgung in Bayern – Planungshilfe für Kommunen“ (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019) werden verschiedene Trocknungsverfahren vorgestellt. Thermische Trocknungsanlagen können erst ab einer Anlagengröße von 5.000 t entwässertem Schlamm pro Jahr wirtschaftlich betrieben werden. Für kleine und mittlere Kläranlagen ist daher derzeit allenfalls eine solare Klärschlamm-trocknung mit einfacher Verfahrenstechnik und geringen spezifischen Energiekosten realisierbar. In der Regel werden entwässerte Klärschlämme (18 bis 30 % TR) in Hallentrocknern eingesetzt, die mit Solarenergie bzw. abwärmegestützt betrieben werden (siehe Abb. 11). Dabei können TR-Gehalte von 60 bis 90 % erzielt werden (DWA-M 379 2021), die jedoch witterungsabhängigen Schwankungen unterliegen. Die Entscheidung über die solare Trocknung hängt von einzelnen Randbedingungen wie dem Flächenbedarf, saisonalen Einflüssen, der vorhandenen Prozesswärme etc. ab. Daneben sind die möglicherweise auftretenden jahreszeitlichen TR-Schwankungen bei der solaren Trocknung mit dem Entsorger abzustimmen.



Abb. 11: Solare Klärschlamm-trocknung in einer Halle

Vor- und Nachteile einer zusätzlichen solaren Klärschlamm-trocknung sind in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Tabelle 2: Vor- und Nachteile einer solaren Klärschlamm-trocknung im Vergleich zu einer Anlagenkonfiguration ohne Trocknung (lediglich Klärschlamm-entwässerung)

Vorteile	Nachteile
<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Transport- und Entsorgungskosten durch niedriges Volumen und Gewicht (höherer TR-Gehalt) 	<ul style="list-style-type: none"> • Investitionskosten • Erhöhter Betriebs- und Personalaufwand • Hoher Flächenbedarf • Witterungsabhängige Wasserverdunstung und jahreszeitliche Schwankungen der Trocknungsleistung führen zu schwankendem TR → ggf. Einschränkungen bei der Entsorgung in Mit- oder Monoverbrennungsanlagen • Ggf. Abgasreinigung notwendig (bei Geruchsproblemen)

Thermische Klärschlamm-behandlungsanlagen (Verbrennung) besitzen in der Regel eigene Trocknungsanlagen, so dass der Klärschlamm entwässert angeliefert werden kann und eine Trocknung auf der Kläranlage nicht erforderlich ist.

Eine zweckmäßige Möglichkeit zur weiteren Klärschlamm-behandlung und -entsorgung bietet die Zusammenarbeit mehrerer Kommunen bzw. Unternehmen im Verbund.

Praxisbeispiel aus der Oberpfalz

Im Rahmen einer interkommunalen Zusammenarbeit (siehe Kapitel 6) wird auf der Kläranlage der Stadt Freystadt (8.000 EW) zusätzlich der Klärschlamm der Kläranlagen Forchheim (1.600 EW), Mönning (1.700 EW) und Schmellnricht (1.150 EW) mit etwa 3,5 % TR entwässert und einer Solartrocknung zugeführt.

Durch die zentrale stationäre Entwässerung werden bei den drei kleinen Kläranlagen im Umkreis stoßartige Rückbelastungen durch Schlammwasser vermieden und die anschließenden Transportkosten durch getrockneten Schlamm gesenkt.

Hinweis:

Wird Klärschlamm auf der Kläranlage maschinell entwässert, so fällt dieser Vorgang als Teil der Abwasserbeseitigung (§ 54 WHG) in den Geltungsbereich des Wasserrechts. Eine nachgeschaltete Trocknungsanlage unterliegt dagegen in aller Regel als eigenständige Anlage dem Abfall- bzw. Immissionsschutzrecht.

5 Klärschlammbehandlung bei Abwasserteichanlagen

Abwasserteiche lassen sich aufgrund ihrer Funktionsweise einteilen in

- Absetzteiche
(Vorstufe vor einer weiteren Behandlung mit dem Ziel, Schlämme abzutrennen und zu sammeln),
- unbelüftete Teiche (meist Anlagen kleiner 1.000 EW), belüftete Teiche und Abwasserteiche mit technischer Zwischenstufe (meist Anlagen bis 5.000 EW) zur biologischen Abwasserbehandlung sowie
- Nachklärteiche
(in der Regel nach belüfteten Abwasserteichen und Abwasserteichen mit technischer Zwischenstufe zur Abtrennung und Sammlung von absetzbaren Stoffen und Schwebstoffen).

Allein in Bayern sind von ca. 1.100 Kläranlagen der Größenklasse 1 etwa 500 Kläranlagen als unbelüftete Abwasserteichanlagen ausgelegt (Stand 2020). Unbelüftete Abwasserteichanlagen bestehen aus einem oder mehreren Teichen, häufig mit vorgeschaltetem Absetzteich. Belüftete Abwasserteiche sind technisch belüftet und haben i. d. R. einen Nachklärteich. Bei Abwasserteichen mit technischer Zwischenstufe sind beispielsweise Tauchkörper oder Tropfkörper zwischengeschaltet. Der anfallende Klärschlamm muss regelmäßig ausgebaggert oder abgepumpt werden. Eine Schlammräumung ist bei den vorgeschalteten Absetzteichen in der Regel einmal jährlich, bei den unbelüfteten und belüfteten Abwasserteichen in größeren Zeitintervallen erforderlich (DWA-A 201 2005).

Die Klärschlamm Entsorgung erfolgt bislang überwiegend als Nassschlamm in der Landwirtschaft oder über benachbarte Kläranlagen.

Unbelüftete Abwasserteichanlagen verfügen teilweise nicht über eine ausreichende technische Infrastruktur (Strom, befestigter Stellplatz etc.) für eine Vorbehandlung oder mobile Entwässerung. Auch eine Schlammwasserspeicherung ist meist aufwendig. In diesen Fällen kann die für eine evtl. beabsichtigte thermische Klärschlammbehandlung erforderliche Vorbehandlung grundsätzlich nur über die Abgabe des Klärschlammes an eine entsprechend aufnahmefähige Kläranlage erfolgen.

Beim Auslaufen wasserrechtlicher Genehmigungen wird immer häufiger ein Zusammenschluss mit Neubau einer gemeinsamen, technischen Kläranlage oder der Anschluss an größere (technische) Kläranlagen als ökonomisch und ökologisch sinnvoller erachtet, als der Weiterbetrieb einer Teichkläranlage. Die Zahl der Teichanlagen in ganz Bayern geht daher seit Jahren zurück.

Wenn bei einer Abwasserteichanlage weiterhin eine landwirtschaftliche Verwertung erfolgen soll, ist eine Nachrüstung mit einer Rechenanlage empfehlenswert.

6 Kläranlagenübergreifende Klärschlammbehandlung

6.1 Möglichkeiten der Fremdschlammannahme

Gerade bei kleinen Kläranlagen kann die Abgabe von Nassschlamm an eine größere Kläranlage eine sinnvolle Option sein. Dies kann, wenn mehrere Kläranlagen betrieben werden, innerhalb einer Kommune erfolgen oder im Rahmen einer interkommunalen Zusammenarbeit. Auf diese Weise können kleine Kläranlagen grundsätzlich mit geringem technischen Eigenaufwand aus der landwirtschaftlichen Verwertung aussteigen. Durch den Aufbau eines regionalen Entsorgungskonzepts mit einer gemeinsamen Klärschlammbehandlung und -verwertung können geringere Investitions- und Betriebskosten erreicht werden (siehe auch Planungshilfe „Klärschlamm Entsorgung in Bayern“, Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

Voraussetzung für eine Fremdschlammannahme ist, dass die aufnehmende Kläranlage ausreichende Kapazitäten zur Behandlung der zusätzlichen Belastung aufweist.

Bei diesen Entsorgungskonzepten entsteht zusätzlicher logistischer Aufwand und es müssen organisatorische und technische Grundvoraussetzungen für die Entsorgung und die Annahme von Klärschlamm geschaffen werden. Es sind unter anderem folgende Aspekte zu klären bzw. zu berücksichtigen:

- Rechtliche Rahmenbedingungen der Zusammenarbeit (siehe Kapitel 6.3)
- Anforderungen an Schlammengen und -qualität (z. B. mit oder ohne Rechengut / Sand, Stabilisierungsgrad)
- Zufahrtsmöglichkeiten
- Behandlungskapazitäten zur Abwasser- und Schlammbehandlung (z. B. Schlammstapel-, Schlammwasser-, Entwässerungs-, Lagerkapazitäten)
- Eine gemeinsame mobile bzw. stationäre Schlammentwässerung
- Verantwortlichkeiten

Phosphorrückgewinnung bei Vermischung von Klärschlämmen?

- Bei der gemeinsamen Behandlung von Klärschlämmen verschiedener Kläranlagen ist zwingend darauf zu achten, dass die Vermischung der Klärschlämme vor der Durchführung von Phosphorrückgewinnungsverfahren nur zulässig ist, sofern die zugeführten Fremdschlämme einen Phosphor-Gehalt von 20 g oder mehr je kg TM aufweisen.
- Die Vermischung darf erst nach Abschluss eines Vertrages (mit Nennung des Verantwortlichen zur Phosphorrückgewinnung) zwischen den beteiligten Klärschlammherzeugern erfolgen und die Kopie des Vertrages muss der zuständigen Behörde auf Verlangen vorgelegt werden.

6.2 Verfahrenstechnische Aspekte bei der Fremdschlammannahme

Bei einer Kläranlage mit anaerober Schlammstabilisierung (Faulung) stehen grundsätzlich verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung, Fremdschlämme mit unterschiedlichen Qualitäten anzunehmen (vgl. Abb. 12).

Bei nassen Fremdschlämmen mit enthaltenem Rechengut und Sand (v. a. von Abwasserteichanlagen) muss die annehmende Kläranlage diese in der Regel direkt in den Zulauf führen. Voraussetzung ist eine leistungsfähige mechanische Reinigung mit Rechen, Sandfang und Vorklärung. Bei der Zugabe über eine Annahmestation werden die Fremdschlämme zwar von Rechengut befreit, jedoch verbleibt ein hoher mineralischer Anteil aufgrund der noch vorhandenen Sandfraktion im Klärschlamm. Diese Schlämme können daher meist nicht direkt in die Faulung eingebracht werden, da die Sandfraktion dort sedimentiert und das Faulraumvolumen reduziert.

Die Zugabe von Fremdschlämmen bei kleinen und mittleren Kläranlagen ist in der Regel nicht empfehlenswert. Anlagen in diesem Größenbereich können den angelieferten Fremdschlamm mangels Faulung nicht energetisch nutzen. Außerdem haben Sie in der Regel keine Vorklärung, so dass es bei der Annahme von Fremdschlämmen zu einer starken Belastung der Biologie kommt.

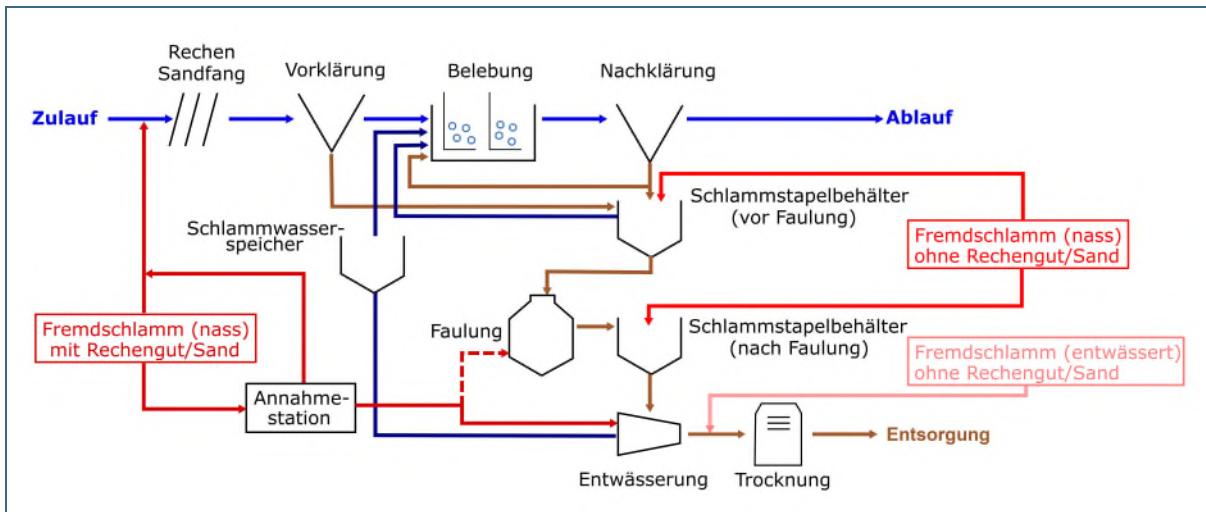


Abb. 12: Annahmemöglichkeiten von Fremdschlämmen in Abhängigkeit der Schlammqualität

Beispiel Kläranlage Pfarrkirchen (49.500 EW)

Auf der Kläranlage Pfarrkirchen in Niederbayern ist eine Annahmestation mit Rechen vorhanden. Fremdschlämme mit Rechengut von anliefernden Teichkläranlagen können so in der Annahmestation zuerst vom Rechengut befreit werden. Anschließend wird der Schlamm in den Abwasserzulauf gepumpt. Zudem gibt es die Möglichkeit, Schlämme ohne Rechengut direkt über einen Schlammschacht der Faulung zuzugeben.

Beispiel Kläranlage Eggenfelden (91.900 EW)

Die Kläranlage Eggenfelden in Niederbayern mit ca. 40.000 EW Belastung kann Fremdschlämme im Schlammwasserspeicher vor der Entwässerung annehmen. Daher können auf dieser Kläranlage nur Schlämme ohne Rechengut mitbehandelt werden. Schlämme von Teichkläranlagen ohne Rechen können nicht angeliefert werden.

6.3 Rechtliche Gestaltung der interkommunalen Zusammenarbeit

Durch eine interkommunale Zusammenarbeit lassen sich gerade für kleine und mittlere Kläranlagen Synergieeffekte erzielen und kann der Ausstieg aus der bodenbezogenen Verwertung erleichtert werden.

Für eine interkommunale Kooperation stehen verschiedene Wege offen, welche im Rahmen einer vertraglichen Vereinbarung der Gemeinden, der Gründung von Zweckverbänden, gemeinsamer Kommunalunternehmen oder der Erweiterung des Aufgabenbereichs bestehender Zweckverbände stattfinden. Bei der Errichtung von Zweckverbänden, Unternehmen oder beim Abschluss von Zweckvereinbarungen muss eine Anzeige bei der zuständigen Aufsichtsbehörde erfolgen oder die Genehmigung dort eingeholt werden (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

Tabelle 3: Mögliche Organisationsformen für eine interkommunale Zusammenarbeit

Organisationsformen	Beschreibung
Zweckvereinbarung	Übertragung von zusammenhängenden Aufgaben an einzelne oder alle zur Erfüllung eines bestimmten Zwecks. Beispielsweise Errichtung und Betrieb von gemeinschaftlichen Einrichtungen unter Beteiligung von Gemeinden, Zweckverbänden und Kommunalunternehmen.
Zweckverband (Körperschaft des öffentlichen Rechts)	Übertragung von zusammenhängenden Aufgaben mit den zugehörigen Hoheitsrechten zur eigenverantwortlichen Wahrnehmung eines bestimmten Zwecks. Mitglieder können Gemeinden, andere Zweckverbände oder (gemeinsame) Kommunalunternehmen und unter bestimmten Voraussetzungen auch private Personen sein.
Gemeinsames Kommunalunternehmen (Anstalt des öffentlichen Rechts mit eigener Rechtspersönlichkeit)	Übertragung von Aufgaben analog wie beim Zweckverband, jedoch mit dem Vorteil, dass die Steuerung des Unternehmens flexibel in der Unternehmenssatzung geregelt werden kann.
Weitere Privatrechtsformen	Beispielsweise GmbH, GmbH & Co. KG

Detaillierte Informationen zu den rechtstechnischen Gestaltungen der interkommunalen Zusammenarbeit und Fördermöglichkeiten sind der Planungshilfe „Klärschlamm Entsorgung in Bayern“ zu entnehmen (Bayerisches Landesamt für Umwelt 2019).

Beispiel Zweckverband Thermische Klärschlammverwertung Schwandorf

Am Standort Schwandorf betreibt der Zweckverband Thermische Klärschlammverwertung Schwandorf (ZTKS) eine Klärschlamm-trocknungsanlage für bis zu 50.000 Tonnen mechanisch entwässerten Klärschlamm. Beim ZTKS handelt es sich um einen Zusammenschluss von 39 Kläranlagenbetreibern unterschiedlicher Größe aus den Regierungsbezirken Niederbayern und Oberpfalz. Der ZTKS transportiert den mechanisch entwässerten Klärschlamm von den Verbandskläranlagen zur Trocknungsanlage nach Schwandorf. Dort wird er auf bis zu 92 % TS getrocknet und das Trockengut anschließend einer thermischen Verwertung zugeführt. Die Verbandsmitglieder haben die Aufgabe der Entsorgung des Klärschlammes ab der Schnittstelle Kläranlage auf den ZTKS übertragen. Mit rund 5 % der gesamten Klärschlammmenge Bayerns ist der ZTKS der größte kommunale Zusammenschluss im Bereich der Klärschlamm-entsorgung in Bayern.

7 Untersuchungspflichten

Die Klärschlammverordnung gibt den Umstieg auf die thermische Behandlung von Klärschlamm für Kläranlagen größer 100.000 EW ab 2029 und Kläranlagen größer 50.000 EW ab 2032 vor.

Für kleinere Kläranlagen bleibt die bodenbezogene Verwertung weiter möglich. Dafür obliegen dem Klärschlammherzeuger definierte Untersuchungspflichten (siehe Tabelle 4), die bei thermischer Behandlung nicht gelten. Hier kann der erforderliche Untersuchungsumfang vom Entsorger bzw. Betreiber der thermischen Klärschlammbehandlungsanlage vorgegeben werden.

Für ausführliche Informationen zur bodenbezogenen Verwertung wird auf das Informationspapier der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) „Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm“ verwiesen.

Der Vollzug der Klärschlammverordnung wird in Bayern in der Regel über das Klärschlammverwaltungsprogramm POLARIS-KS-Verwerter Bayern durchgeführt. In dieses System werden sowohl die bodenbezogenen als auch klärschlammbezogenen Analysenergebnisse eingegeben.

Hätten Sie es gewusst?

- Die Analysekosten für die bodenbezogene Verwertung liegen in einem Bereich von rund 1.000 € bis 1.400 € (Stand: Herbst 2021).
- Die Untersuchungsergebnisse müssen innerhalb von vier Wochen nach Durchführung der zuständigen Behörde vorgelegt werden.
- Probenahme, -vorbereitung und -analyse müssen von einer unabhängigen und notifizierten Untersuchungsstelle durchgeführt werden.
- Die Analysekosten, die für notwendige Untersuchungen bei der thermischen Behandlung anfallen, unterscheiden sich nicht wesentlich. Unterschiede ergeben sich im Untersuchungsumfang und in der Bestimmungsmethode (Doppel- oder Einfachbestimmung).
- POLARIS-KS-Verwerter ist ein webbasiertes Programm mit integriertem Geoinformationssystem zur Erfassung, Prüfung und Dokumentation der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung.

Tabelle 4: Klärschlammuntersuchungen und -häufigkeiten mit Angabe der Grenzwerte und Kennzeichnungsschwellen nach Klärschlammverordnung (AbfKlärV) und Düngemittelverordnung (DüMV) in Anlehnung an Tabelle 5, DWA-M 384 2022

Parameter	Grenzwert nach AbfKlärV und DüMV	Kennzeichnungsschwelle nach DüMV	Untersuchungshäufigkeiten		
			Kläranlagen < 1.000 EW	Kläranlagen ≤ 750 t TM	Kläranlagen > 750 t TM
	mg/kg TM (Ausnahmen sind angegeben)				
„kleine Klärschlammuntersuchung“					
As	40	20	mindestens alle 2 Jahre (Behörde kann auf 6 Monate verkürzen oder auf 48 Monate ausdehnen)	je angefangene 250 t TM pro Jahr, mindestens alle 3 Monate	je angefangene 250 t TM pro Jahr, höchstens einmal monatlich
Pb	150	100			
Cd < 5 % P ₂ O ₅ FM	1,5	1,0			
Cr ¹⁾ (ges.)	-	300			
Cr(VI)	2	1,2			
Cu	900	200			
Ni	80	40			
Hg	1,0	0,5			
Tl	1,0	0,5			
Zn	4.000	200			
Fe ¹⁾	-	0,04 (als % TM) Landwirtschaft: 1			
AOX	400	-			
Gesamtstickstoff	-	-			
Ammonium	-	-			
Phosphor	-	-			
Trockenrückstand	-	-			
organische Substanz	-	-			
Calciumoxid	-	-			
pH-Wert	-	-			
für „große Klärschlammuntersuchung“ zusätzliche Parameter					
Polychlorierte Biphenyle (PCB), jeweils für die Kongenere 28, 52, 101, 138, 153, 180	0,1	-	mindestens alle 2 Jahre kann bei Zustimmung der landwirtschaftlichen Fachbehörde nach Erstuntersuchung entfallen	mindestens alle 2 Jahre	
Summe der Dioxine und dl-PCB (WHO-TEQ 2005)	30 ng TE/kg TM	8 ng TE/kg TM			
Benzo(a)pyren	1	-			
Perfluorierte Tenside (PFOA + PFOS)	0,1	0,05			

¹⁾ Für Eisen und Chrom bestehen gemäß § 5 Absatz 1 AbfKlärV Untersuchungspflichten; ein Grenzwert existiert allerdings weder in der DüMV noch in der AbfKlärV.

Weitere Informationen, Abschlussbericht der Universität der Bundeswehr München

Der Leitfaden basiert auf dem Vorhaben „Untersuchungen zur Entwässerung, Trocknung und Entsorgung von Klärschlamm kleiner und mittlerer Kläranlagen“, welches von der Universität der Bundeswehr München im Auftrag des LfU durchgeführt wurde. Der Abschlussbericht ist in den Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen Nr. 136 der Universität der Bundeswehr München veröffentlicht unter <https://athene-forschung.unibw.de/145512>

8 Literaturverzeichnis

- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2019): Klärschlamm Entsorgung in Bayern. Planungshilfe für Kommunen. Unter Mitarbeit von Dieter Tronecker, Andreas Happach, Juliane Thimet, Andreas Gaß, Arnold Rupprich. – Augsburg: 62 S.
- Bayerisches Landesamt für Umwelt [Hrsg.] (2021): Umsetzung der EG-Kommunalabwasserrichtlinie in Bayern. Lagebericht 2020. – Augsburg: 22 S.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft [Hrsg.] (2021): Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm. – Freising-Weihenstephan: 19 S.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA (2004): Rückbelastung aus der Schlammbehandlung. Verfahren zur Schlammwasserbehandlung. Arbeitsbericht der DWA-Arbeitsgruppe AK-1.3 „Rückbelastung aus der Schlammbehandlung“. Hennef: 23 S.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA (2005): Arbeitsblatt DWA-A 201 Grundsätze für Bemessung, Bau und Betrieb von Abwasserteichanlagen. Hennef: 20 S.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA (2019): Merkblatt DWA-M 383 Kennwerte der Klärschlammwässerung. Hennef: 70 S.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA (2021): Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm Trocknung. Hennef: 98 S.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. – DWA (2022): Merkblatt DWA-M 384 Bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen – Rechtliche Rahmenbedingungen und ihre Umsetzung in der Praxis. Hennef: 57 S.
- DIN EN 16323:2014-7: Wörterbuch für Begriffe der Abwassertechnik; Dreisprachige Fassung EN 16323:2014.



Eine Behörde im Geschäftsbereich
Bayerisches Staatsministerium für
Umwelt und Verbraucherschutz

