



# Klärschlammmentsorgung 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](mailto:poststelle@lfu.bayern.de)  
Internet: [www.lfu.bayern.de/](http://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, Augsburg.

bifa Umweltinstitut GmbH, Dr. Dieter Tronecker  
bifa Umweltinstitut GmbH, Andreas Happach  
Bayerischer Gemeindetag, Dr. Juliane Thimet  
Bayerischer Gemeindetag, Dr. Andreas Gaß  
LfU, Referat 34, Arnold Rupprich

### Redaktion:

LfU, Referat Nr. 34

### Bildnachweis:

LfU außer:

Dr.-Ing. Dieter Schreff, Ingenieurbüro für Wasser, Abwasser und Energie, Am Buchhölzl 11, 83737 Irschenberg, S. 16  
Biogas Alerheim OHG, Fessenheimer Str. 9, 86733 Alerheim, Titel und S. 25  
bifa Umweltinstitut GmbH, Am Mittleren Moos, 86167 Augsburg, S. 46  
Emter GmbH, Alpenstraße 50, 86972 Altenstadt, S. 32 und 33  
Kopf SynGas GmbH & Co. KG, Stützenstraße 6, 72172 Sulz-Bergfelden, S. 35  
EISENMANN Maschinenbau GmbH & Co. KG, Tübinger Straße 81, 71032 Böblingen, S. 36

### Stand:

April 2019, 2. 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 122220 oder per E-Mail unter [direkt@bayern.de](mailto: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

<b>Zusammenfassung</b>	<b>6</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>7</b>
<b>2 Klärschlammentsorgung in Bayern</b>	<b>8</b>
2.1 Kläranlagengrößen und -anzahl sowie anfallende Klärschlammmengen	8
2.2 Stand der Klärschlammentsorgung in Bayern	8
<b>3 Boden- und Gewässerschutz</b>	<b>12</b>
3.1 Klärschlamm als Schadstoffsенke	12
3.2 Schadstoffe im Klärschlamm	12
3.3 Keime im Klärschlamm	13
3.4 Vorsorgender Boden- und Gewässerschutz bei der Klärschlammentsorgung	13
<b>4 Grundlagen für die Erstellung eines Klärschlammkonzeptes</b>	<b>14</b>
4.1 Strategische Überlegungen	14
4.2 Datenerhebung und Konzepterstellung	16
<b>5 Entwässerung und Trocknung</b>	<b>18</b>
5.1 Entwässerung	18
5.2 Trocknung	18
5.2.1 Allgemeines	18
5.2.2 Verfahrensprinzipien	19
5.2.3 Trocknerarten	19
5.2.3.1 Konvektionstrockner	19
5.2.3.2 Kontaktrockner	19
5.2.3.3 Strahlungstrockner	20
5.2.4 Vergleich der verschiedenen Verfahrensprinzipien	24
5.2.5 Wärmerückgewinnung sowie Brüden- und Abluftbehandlung	25
5.2.6 Wärmebedarf für die Klärschlamm-trocknung	25
5.2.6.1 Konvektions- und Kontaktrockner	25
5.2.6.2 Solarunterstützte Trocknung	26
<b>6 Entsorgungswege für Klärschlamm</b>	<b>27</b>
6.1 Mitverbrennung	27
6.1.1 Kohlekraftwerk	27

6.1.2	Zementwerk	27
6.1.3	Müllheizkraftwerk	28
6.2	Monoverbrennung	28
6.2.1	Wirbelschichtverbrennungsanlagen	29
6.2.2	Rostfeuerungsanlage der Fa. Emter GmbH	29
6.3	Vergasungs- und Pyrolyseverfahren	30
6.3.1	Vergasungsverfahren der Fa. SÜLZLE Kopf SynGas GmbH & Co. KG	30
6.3.2	Pyrobustor® der Fa. Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG	31
6.3.3	Pyreg-Verfahren	32
<b>7</b>	<b>Ressourcenschonung</b>	<b>33</b>
7.1	Allgemeines zur Ressource Phosphor	33
7.2	Phosphor-Potenziale im Abwasser und Klärschlamm	33
7.3	Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor	34
7.3.1	Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser und Schlammwasser	34
7.3.2	Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm	35
7.3.3	Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen	36
7.4	Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm	37
<b>8</b>	<b>Vergleich der ökologischen Auswirkungen</b>	<b>39</b>
8.1	Gesundheitsschutz	39
8.2	Ressourcenschutz	39
8.3	Fazit	39
<b>9</b>	<b>Kosten der Klärschlamm Entsorgung</b>	<b>40</b>
9.1	Speicherung	40
9.2	Transporte	40
9.2.1	Transporte zur Entwässerung	40
9.2.2	Transporte zur Trocknung	40
9.2.3	Transporte zur thermischen Behandlung	41
9.3	Entwässerung	41
9.4	Trocknung	41
9.4.1	Solare Trocknung	41
9.4.2	Thermische Trocknung	41

---

9.5	Thermische Behandlungsverfahren	42
9.5.1	Monoverbrennung	42
9.5.2	Mitverbrennung im Kohlekraftwerk	42
9.5.3	Mitverbrennung im Müllheizkraftwerk	42
9.5.4	Zementwerk	42
9.5.5	Vergasungs- und Pyrolyseverfahren	42
9.5.6	Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung	42
9.5.7	Landbauliche Klärschlammverwertung (Rekultivierung)	43
9.6	Gesamtbetrachtung der Kosten	43
<b>10</b>	<b>Möglichkeiten interkommunaler Zusammenarbeit</b>	<b>46</b>
10.1	Grundsätzliche Überlegungen zur Zuständigkeit der Gemeinden	46
10.2	Aufgabenwahrnehmung in interkommunaler Zusammenarbeit	47
10.3	Vermischungsverbot	48
10.4	Rechtsrahmen	48
10.5	Organisationsformen	49
10.5.1	Zweckvereinbarung, öffentlich-rechtlicher Vertrag	49
10.5.2	Zweckverband	50
10.5.3	Gemeinsames Kommunalunternehmen	51
10.5.4	Privatrechtsformen	52
10.5.4.1	Gesellschaft mit beschränkter Haftung (GmbH)	52
10.5.4.2	GmbH & Co. KG	53
10.6	Möglichkeiten der Förderung	54
10.6.1	Förderung nach „RIZ“	54
10.6.2	Kommunalrichtlinie	55
	<b>Anhang: Erhebungsbogen</b>	<b>56</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>57</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>61</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>62</b>

## Zusammenfassung

Klärschlamm ist die Schadstoffslenke 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 bei den betroffenen Kreisen (z.B. Komposthersteller) sowie bei der bodenbezogenen Nutzung des Klärschlamms berücksichtigt. Neben der landwirtschaftlichen Verwertung sind nun auch der Landschaftsbau und die Rekultivierung betroffen. Auch die Produkte Klärschlammkompost und –gemisch fallen nun unter die ABFKLÄRV (2017). Der Bereich der zu untersuchenden Schadstoffe wurde erweitert, viele Grenzwerte abgesenkt (Kapitel 3).

Die Bayerische Staatsregierung hat vor rund 20 Jahren aus Gründen eines vorsorgenden Verbraucher-, Boden- und Gewässerschutzes entschieden, auf ein Ende der bodenbezogenen – das umfasst landwirtschaftliche, gärtnerische und landschaftsbauliche – Verwertung von Klärschlamm hinzuwirken. Die 2001 vom Ministerrat beschlossene „Strategie für eine zukunftsfähige Klärschlammentsorgung in Bayern“ sollte „ökologisch vorteilhaft sein, zur weitgehenden Schadstoffentfrachtung und Schadstoffzerstörung führen und die Möglichkeit offenlassen, durch geeignete neue Techniken wesentliche Nährstoffinhalte vor einer Beseitigung zurückzugewinnen und einem Verwertungskreislauf zuzuführen“ (BAYERISCHER MINISTERRAT 2001). 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 wurde vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Gesundheit initiiert, die vorliegende Version vom Bayerischen Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz zur Anpassung an die aktuellen Gegebenheiten veranlasst. Sie 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).

Ein besonderes Augenmerk legt die Planungshilfe auf die Ressourcenschonung.

Das Kapitel Ressourcenschonung geht auf die Möglichkeiten der Rückgewinnung von Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammaschen ein. Grundsätzlich ist die Phosphorrückgewinnung umso einfacher, je höher die Konzentration im Medium ist. Hinsichtlich dieses Aspektes ist die Monoverbrennung der Mitverbrennung überlegen (Kapitel 7 und 8).

Orientierungswerte für die Kosten der einzelnen Behandlungsschritte sind im Kapitel 9 zusammengestellt. Die Behandlungskosten bewegen sich insgesamt in einer Größenordnung von ca. 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 10).



# 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 (ABFPV 2006) und das Landesentwicklungsprogramm Bayern (LEP) 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 Klärschlamm Entsorgung in Bayern ist es, den Entscheidungsträgern ein Werkzeug an die Hand zu geben, mit dem sie 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.

Die vorliegende Planungshilfe hat das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz initiiert. Die erste Ausarbeitung 2010 erfolgte durch das Bayerische Landesamt für Umwelt (LfU) auf der Grundlage einer regionalen Untersuchung zur Klärschlamm Entsorgung sowie eines Entwurfskonzepts für die Handlungshilfe, erstellt von der U.T.E. Ingenieur GmbH, Regensburg. Die Überarbeitung 2018 erfolgte durch das LfU, für die Kapitel 8 und 9 durch die bifa Umweltinstitut GmbH. Das Kapitel 10 wurde unter maßgeblicher Beteiligung des bayerischen Gemeindetags erstellt.

## 2 Klärschlamm Entsorgung in Bayern

### 2.1 Kläranlagengrößen und -anzahl sowie anfallende Klärschlamm m e n g e n

Bayerns Kläranlagenstruktur ist geprägt durch viele kleine ländliche Kläranlagen. Nahezu 50 % der derzeit 2.530 kommunalen Kläranlagen (2016) weisen eine Ausbaugröße < 1.000 Einwohnerwerte (EW<sup>1</sup>) auf. An der Gesamtausbaugröße der bayerischen Kläranlagen von 26,7 Mio. EW beträgt ihr Anteil jedoch weniger als 2 % (siehe Tab. 1).

Tab. 1: Anzahl und Ausbaugrößen der bayerischen kommunalen Kläranlagen (Stand: 2016 (LFU 2018))

Ausbaugröße in EW	Größenklasse nach Abwasserverordnung	Anzahl kommunale Kläranlagen	Gesamtausbaugröße in EW
< 1.000	1	1.177	0,43 Mio.
1.000 bis 5.000	2	750	2,01 Mio.
5.001 bis 10.000	3	222	1,70 Mio.
10.001 bis 50.000	4a	302	6,99 Mio.
50.001 bis 100.000	4b	43	3,24 Mio.
> 100.000	5	36	12,35 Mio.
<b>Gesamt Bayern</b>		<b>2.530</b>	<b>26,72 Mio.</b>

In den Jahren 2013 bis 2017 fielen in den bayerischen kommunalen Kläranlagen zwischen 257.000 bis 270.000 Tonnen Trockenmasse<sup>2</sup> (t TM) Klärschlamm an; durchschnittlich ca. 266.000 t TM. Unter der Annahme eines durchschnittlichen Trockenrückstandsgehaltes<sup>3</sup> (TR-Gehalt) von ca. 5 % des in den Kläranlagen anfallenden Schlammes entspricht dies einer anfallenden Nassschlammmenge von ca. 5,5 Mio. Tonnen pro Jahr.

### 2.2 Stand der Klärschlamm Entsorgung in Bayern

Die längerfristige Entwicklung der Entsorgung des bayerischen Klärschlammes zeigt die nachfolgende Abb. 1. Die landwirtschaftliche Verwertung ist seit Mitte der 90er Jahre stark rückläufig. Während im Jahr 1995 noch mehr als 50 % des Klärschlammes in der Landwirtschaft ausgebracht wurden, waren es im Jahr 2017 nur noch 12 %. Die thermische Behandlung (Verbrennung) hat im gleichen Zeitraum stark zugenommen. Der Einsatz des Klärschlammes bei Rekultivierungsmaßnahmen ist nach einem zwischenzeitlich höheren Anteil, 2006 noch bei 34,7 %, mit 19,4 % wieder auf das Niveau von 1996 zurückgegangen, mit weiter sinkender Tendenz. Die Deponierung von Klärschlamm ist nicht mehr zulässig und spielt in Bayern keine Rolle mehr.

<sup>1</sup> 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.

<sup>2</sup> 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.

<sup>3</sup> 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.

Im Jahr 2017 war die thermische Behandlung mit 68,6 % der entsorgten Klärschlammmenge der wichtigste Entsorgungsweg. Einer stofflichen Verwertung bei Rekultivierungsmaßnahmen oder im Landschaftsbau wurden 19,4 % zugeführt. 44 % des bayerischen Klärschlammes wird derzeit außerhalb Bayerns entsorgt und dort vor allem bei Rekultivierungsmaßnahmen oder in Kohlekraftwerken eingesetzt. Innerhalb Bayerns dominiert die thermische Behandlung des Klärschlammes mit fast 80 %.

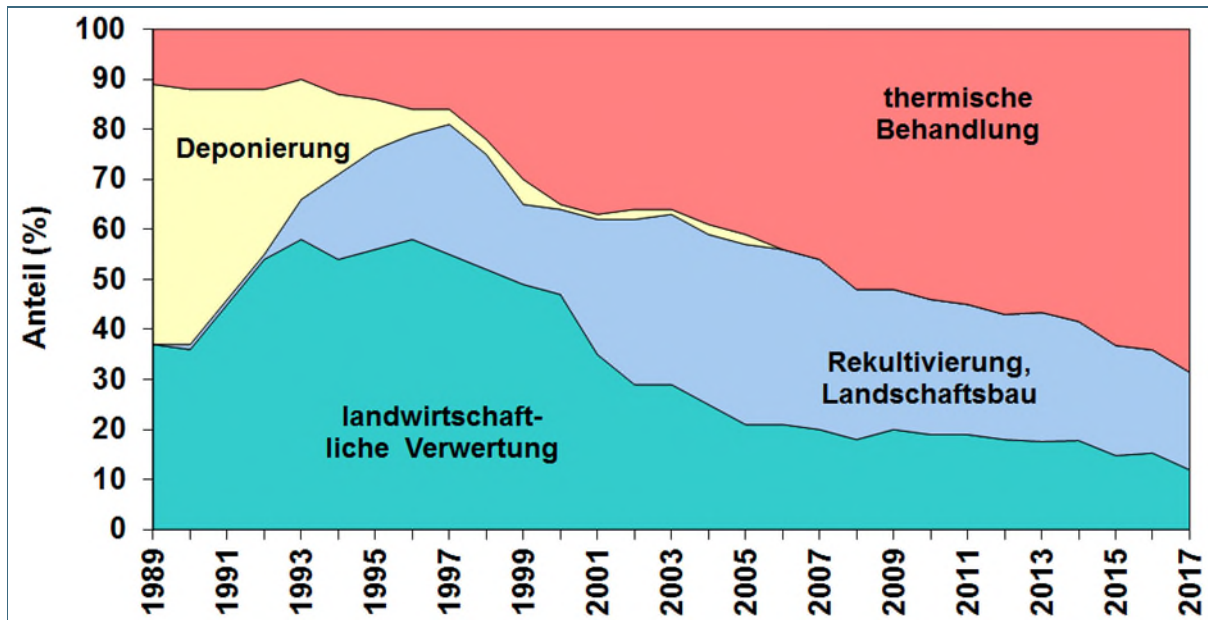


Abb. 1: Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung in Bayern

Die Abb. 2 zeigt die prozentualen Anteile der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung in den einzelnen Landkreisen und kreisfreien Städten Bayerns. 62 der insgesamt 96 Gebietskörperschaften liegen in diesem Bereich bei Verwertungsquoten von 0 bis 20 %. Nur fünf Gebietskörperschaften verwerten noch etwa die Hälfte ihrer Klärschlammengen landwirtschaftlich.

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



Abb. 2: Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung in Bayern

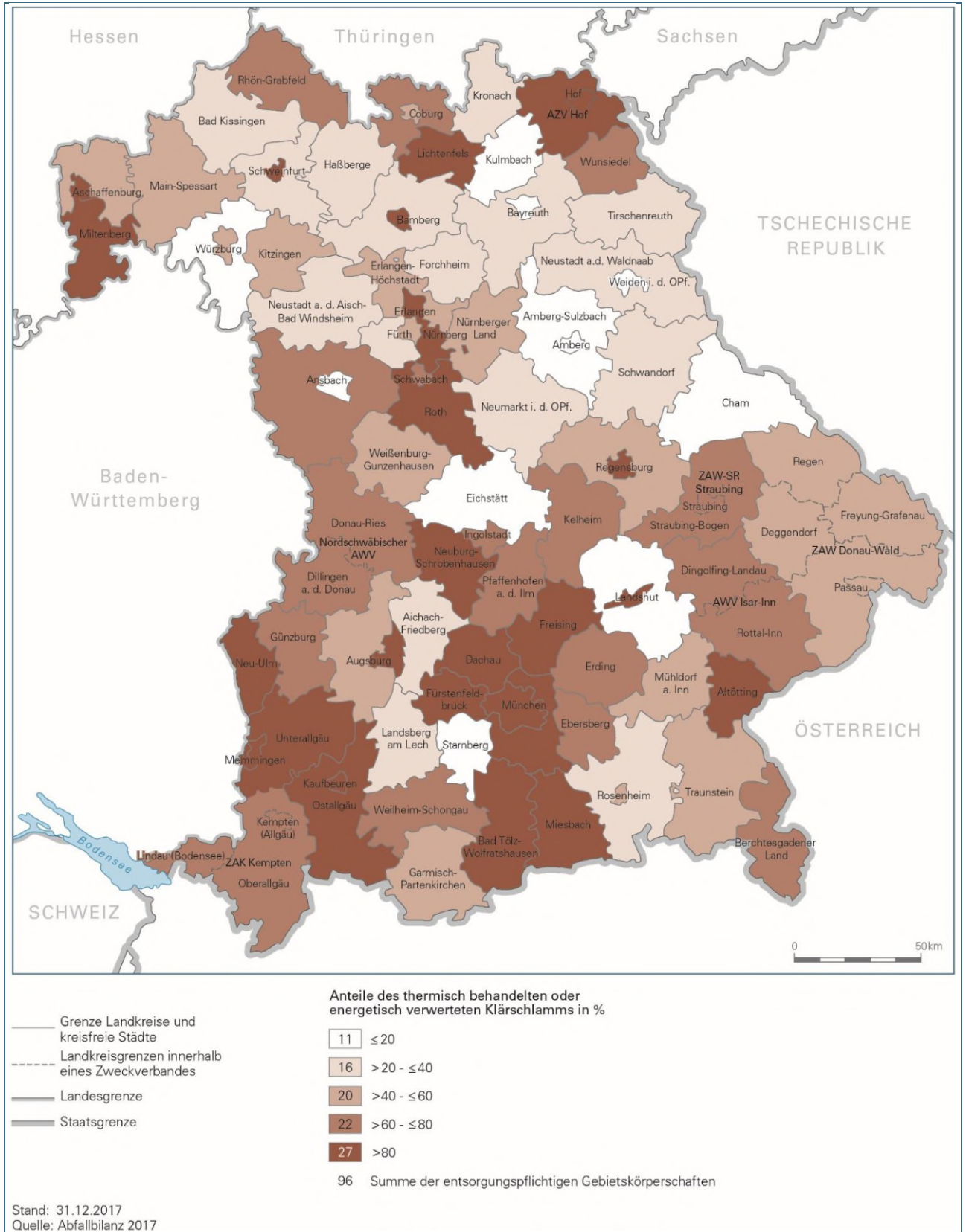


Abb. 3: Thermische Klärschlammbehandlung in Bayern

## 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 Stoffe zu (z. B. Desinfektionsmittel, Arzneimittelrückstände, 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 Schadstoffe im Klärschlamm

Bei der landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm sind neben der Klärschlammverordnung (AbfKlärV) insbesondere die Vorgaben des Düngemittelrechts zu beachten. Die AbfKlärV enthält u. a. Untersuchungs- und Nachweispflichten. Die zu untersuchenden Parameter sind jedoch auf neun Schwermetalle sowie adsorbierbare organische Halogenverbindungen (AOX), polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Dibenzodioxine und -furane (PCDD/PCDF), Benzo(a)pyren (B(a)P) und perfluorierte Tenside (PFT) beschränkt. Großteils bezieht sich die AbfKlärV bei den Grenzwerten auf die Düngemittelverordnung (DÜMV 2017). Das Gefährdungspotenzial des Klärschlammes wird daher nur unzureichend erfasst. Bei umfangreichen Untersuchungen (LFU 2011A) wurden bayerische Klärschlämme auf eine Vielzahl an weiteren organischen Schadstoffen (z. B. Weichmacher, Flammschutzmittel, Desinfektionsmittel) untersucht. Diese Stoffe sind großteils langlebig (persistent), besitzen meist eine hohe Bioakkumulation und z. T. eine hohe Ökotoxizität. In nahezu allen untersuchten Klärschlämmen konnten diese zusätzlichen Parameter in unterschiedlichen Konzentrationen nachgewiesen werden.

PFT sind eine Stoffgruppe, die Anfang 2000 als relevante Inhaltsstoffe des Klärschlammes bekannt wurden. PFT 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 PFT liegen im Bereich der Oberflächenbehandlung von Metallen (Verchromung), der Foto- und Halbleiterindustrie, der Papierveredelung und der Spezialchemie. Auch in Hydraulikflüssigkeiten von Flugzeugen und in Feuerlöschmitteln werden und wurden sie eingesetzt.

In Bayern wurden von 2006 bis 2017 elf PFT-Verbindungen als Summenwert betrachtet und mit einem Vorsorgewert von 100 µg/kg Trockenmasse (TM) bei der landwirtschaftlichen Verwertung belegt. Mit der AbfKlärV ist nun ein Grenzwert von 0,1 mg/kg TM für die Summe PFOA und PFOS festgelegt, ohne Messtoleranzen. Von 2006 bis 2013 wurde, bei insgesamt ca. 1.000 untersuchten bayerischen Kläranlagen, bei ca. 6 % mindestens bei einer Messung eine Überschreitung des Vorsorgewertes im Klärschlamm festgestellt. Derartiger Klärschlamm ist einer thermischen Behandlung zuzuführen.

### 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.

Mit der novellierten Klärschlammverordnung wurde dies 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 (2017) entsprechen.

### 3.4 Vorsorgender Boden- und Gewässerschutz bei der Klärschlamm entsorgung

Durch die letzten Änderungen der Klärschlammverordnung und im Düngemittelrecht ist ein Rückgang der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung gegeben. Da die neuen 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. Dennoch ist aus bayerischer Sicht am Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung festzuhalten. 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.

## 4 Grundlagen für die Erstellung eines Klärschlammkonzeptes

### 4.1 Strategische Überlegungen

Klärschlammkonzepte 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 sollte möglichst schon die Phosphorrückgewinnung berücksichtigt werden.

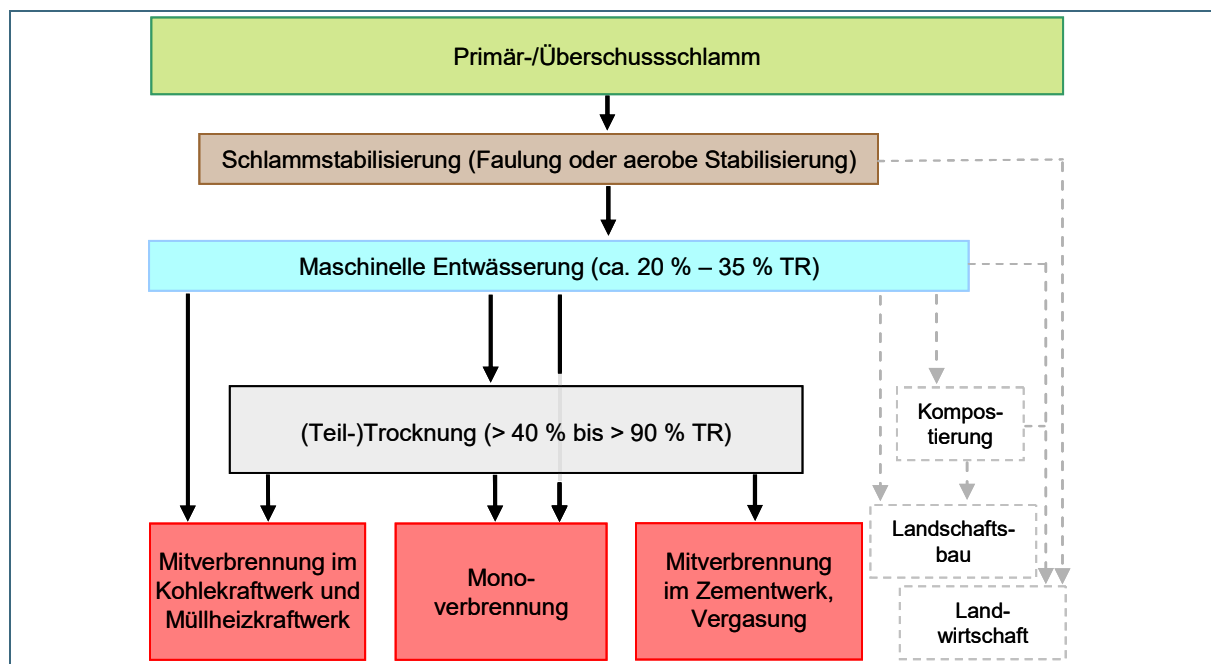


Abb. 4: Übersicht über die Behandlungs- und Entsorgungswege von Klärschlamm

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 Mitverbrennung im Kohle- oder Müllheizkraftwerk, Monoverbrennung, Zementwerk oder Vergasung behandelt werden. Es muss hier aber bereits darauf hingewiesen werden, dass ab 2029 Klärschlammmitverbrennungsanlagen, die Klärschlamm aus Anlagen > 100.000 EW und mit Phosphorgehalten > 20 g/kg TM einsetzen, nur noch mit Kohle oder Gas befeuert werden dürfen<sup>4</sup>. Daneben kann die direkte Verwertung – teilweise auch ohne Entwässerung – bei der Kompostierung, in der Landwirtschaft oder im Landschaftsbau erfolgen. Dieser Verwertungsweg ist gestrichelt dargestellt, da die thermische Klärschlammbehandlung in Bayern favorisiert wird.

<sup>4</sup> Art. 5 Nr. 6 (neuer § 3b (2)) der Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung vom 27.09.2017



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.

Im Folgenden wird aufgezeigt, welche Auswirkungen sich bei ausschließlich thermischer Verwertung für verschiedene Kläranlagenrößen im Rahmen eines regionalen Klärschlamm Entsorgungskonzeptes ergeben können. Abb. 5 stellt beispielhaft die mögliche Struktur eines regionalen Entsorgungskonzeptes dar. Kleine Kläranlagen (Kategorie ①) liefern ihren Nassschlamm zu einer in der Nähe gelegenen größeren Kläranlage, die den Schlamm entwässert (Kategorie ②). Zum weiteren Wasserentzug können bei den Kläranlagen der Kategorie ② Trocknungsanlagen installiert sein. Die entwässerten oder getrockneten Schlämme werden zur thermischen Behandlung der zentralen Anlage der Kategorie ③ zugeführt. Dort können ggf. auch direkt Nassschlämme angeliefert werden.

Zu den Anlagen der Kategorie ① 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.

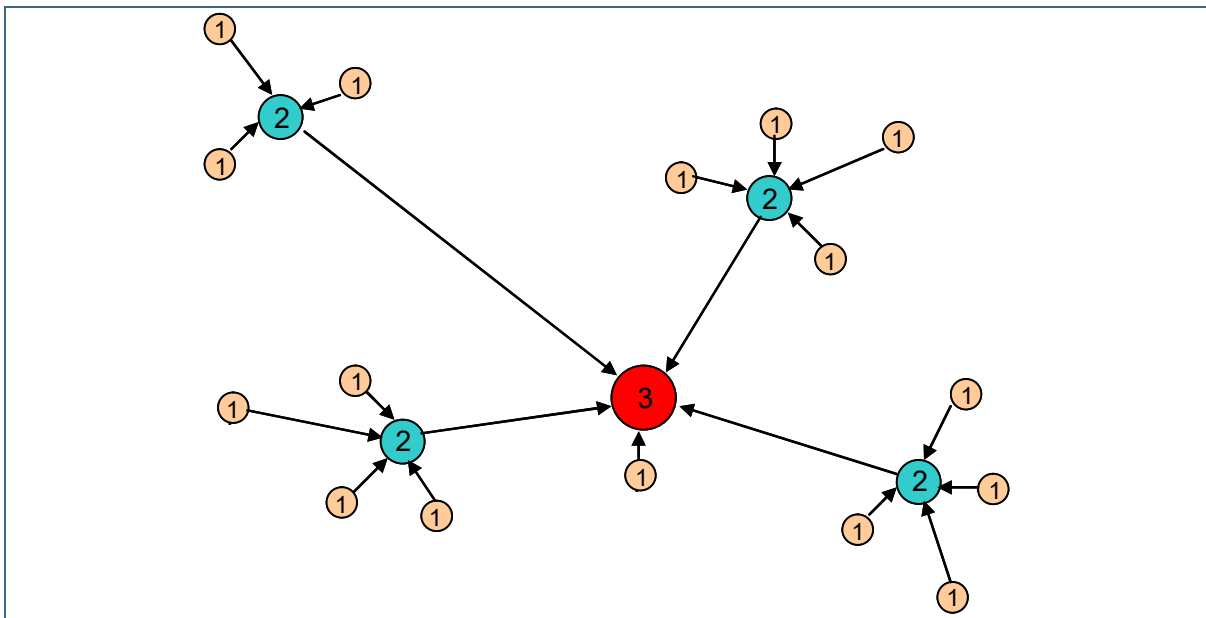


Abb. 5: Aufbau eines regionalen Klärschlamm Entsorgungskonzeptes

Aber auch die Entwässerung mit einem mobilen Aggregat ist aufgrund der stoßweisen Zugabe des Schlammwassers problematisch (siehe 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 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 Bildung von fischgiftigem Ammoniak 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 10) könnte das Problem des abgepressten Wassers ggf. durch mobile Lagerbehälter und organisatorischer Abstimmung der einzelnen Kläranlagen gelöst werden.

Bei den Anlagen der Kategorie ② handelt es sich um Kläranlagen in einer Größenordnung von 10.000 EW und größer (Größenklasse 4a, 4b und 5). Sie benötigen ggf. Annahmestationen für Fremdschlämme. Viele Anlagen dieser Größenordnung besitzen eine anaerobe Schlammstabilisierung. Unter Umständen können daher angelieferte Fremdschlämme auch noch 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. Außerdem wird hierdurch die Palette der Entsorgungsmöglichkeiten erweitert. 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 oder solarer Energie ist unter diesem Aspekt zu bevorzugen.

Anlagen zur thermischen Behandlung von Klärschlamm sind erst ab einer bestimmten Größe wirtschaftlich darstellbar. Als Standort kommen daher i. d. R. nur sehr große Kläranlagen in Frage, wobei der günstigste Standort für eine thermische Behandlung jedoch auch unabhängig vom Kläranlagenstandort gewählt werden kann. Bei Kläranlagen der Kategorie ③ kann bei einer thermischen Behandlung am Standort der Kläranlage die anaerobe Stabilisierung mit Faulgasgewinnung möglicherweise wegfallen, um den Heizwert des Klärschlammes vollständig auszunutzen. Ggf. kann sich auch anbieten, die Klärschlammmonverbrennung am Standort einer großen thermischen Abfallbehandlungsanlage einzurichten. Hierdurch kann sich bei der Klärschlamm-trocknung und der Abgasreinigung ein erheblicher Spareffekt ergeben.

## 4.2 Datenerhebung und Konzepterstellung

Als Voraussetzung für die Erstellung eines Klärschlammkonzeptes müssen die folgenden Grunddaten erhoben werden (siehe Erhebungsbogen im Anhang):

- Standort, Art, Betreiberdaten und Ausbaugröße der Kläranlagen
- Auslastung der Kläranlagen
- Art der Phosphatelimination
- Anfallende Klärschlamm-mengen ( $\text{m}^3/\text{a}$ , % TR)
- Art der Schlammstabilisierung (z. B. Faulung)
- Schlamm-lagerkapazitäten (Speichergröße, Möglichkeiten der Eindickung)
- Art der maschinellen Klärschlamm-entwässerung 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 Klärschlamm-entsorgung
- 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)
- 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-)Behandlungsanlage) als auch zentrale Lösungen (z. B. Mitverbrennung in Kohlekraftwerken) untersucht und unter technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten bewertet werden.

Der Aspekt der Phosphorrückgewinnung ist bei der Konzepterstellung einzubeziehen. 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.

Ganz grundlegend für die Planung ist zudem, dass vor Ort frühzeitig Akzeptanz in der Bevölkerung geschaffen wird.

## 5 Entwässerung und Trocknung

### 5.1 Entwässerung

Entwässerter Klärschlamm weist in der Regel einen TR-Gehalt von 22 – 35 % auf. Für die Entwässerung stehen verschiedene Technologien wie Zentrifugen, Bandfilter-, Kammerfilter- oder Schneckenpressen zur Verfügung. Ausführliche Informationen zum Thema „Maschinelle Schlammentwässerung“ können dem Merkblatt M 366 der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) entnommen werden (DWA 2013). 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. Das Schlammwasser ist hauptsächlich mit organischen Verbindungen, Stickstoff (überwiegend in Form von Ammonium) und Phosphor belastet. Da die Ammoniumstickstoff-Rückbelastung (= Rückführung von im Filtrat gelöstem Ammoniumstickstoff in den Kläranlageneinlauf) ca. 15 - 25 % der Zulauffracht entspricht (MEYER, WILDERER 2003), ist eine gedroselte 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. Dort, wo diese Rahmenbedingungen nicht eingehalten werden können, kann keine Klärschlammentwässerung erfolgen.

Die Entwässerungsgrade lassen sich i. d. R. 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

Entwässerter Klärschlamm kann – abhängig vom nachfolgenden Entsorgungsverfahren – noch weiter getrocknet werden. Voraussetzung für die Trocknung ist in der Regel eine vorherige Entwässerung auf einen TR-Gehalt von > 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 Schlammes bewirkt eine Volumen- und Massenreduktion und reduziert in der Folge Aufwendungen für dessen Transport und die anfallenden Entsorgungskosten. Vor allem aber erhöht eine Trocknung den Heizwert des Klärschlammes wesentlich. Weitere Vorteile von getrocknetem Klärschlamm sind seine Geruchsneutralität, eine erhöhte biologische Stabilität und die gute Lagerfähigkeit.

Die einzelnen Trocknungsgrade lassen sich wie folgt charakterisieren:

- Von 35 bis 60 % TR ist Klärschlamm klebrig. Diese Phase wird auch als Leimphase bezeichnet. Sie kann bei Trocknern und Verbrennungsanlagen aufgrund von Anbackungen Betriebsprobleme verursachen.
- Zwischen 60 und 85 % TR ist Klärschlamm fest und streufähig.
- Zwischen 85 und 95 % TR ist er feinkörnig und der Staubanteil steigt an.

## 5.2.2 Verfahrensprinzipien

Klärschlamm-trocknungsanlagen lassen sich anhand verschiedener Kriterien einordnen. Im Folgenden wird das Kriterium „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 nicht oder von untergeordneter Bedeutung sind. Eine sehr fundierte Darstellung der Klärschlamm-trocknung findet sich in (THOMÉ-KOZMIENSKY 1998) eine Fortschreibung zum aktuellen Stand dazu in HOLM et al. (2018). Eine detaillierte Beschreibung der im Folgenden skizzierten Trocknerarten findet sich in (DWA 2004). Darin werden auch noch 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“ bezeichnet. Diese Abgrenzung ist streng genommen nicht ganz korrekt, da natürlich auch Solartrockner und v. a. solarunterstützte Trockner thermische Trockenverfahren darstellen.

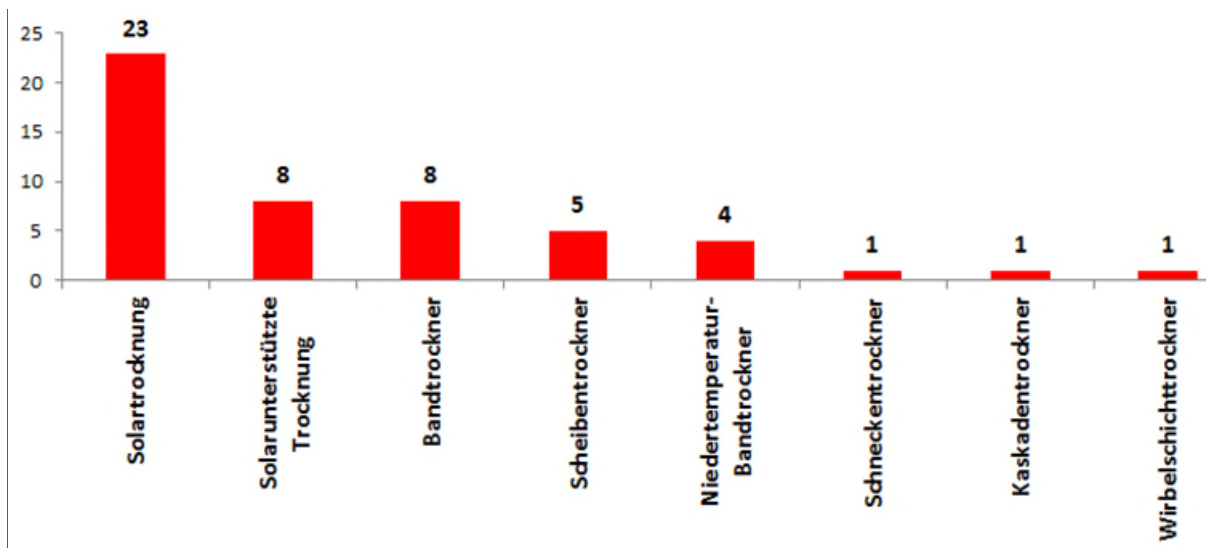


Abb. 6: Übersicht über in Bayern betriebene Trocknersysteme (Stand 2015)

Zu beachten ist, dass das nominelle Übergewicht der „solaren“ Trocknungsanlagen durch die meist höheren Durchsätze der thermischen Trockner im Bezug auf den Gesamtdurchsatz relativiert wird.

Die Tab. 2 gibt einen Überblick über Verfahrensmerkmale sowie wesentliche Vor- und Nachteile der verschiedenen Trocknerarten. Eine weitergehende Darstellung von Verfahrensmerkmalen mit Energiekennzahlen sowie Vor- und Nachteilen der verschiedenen Verfahren findet sich in (SCHREFF 2005).

### 5.2.3.1 Konvektionstrockner

Bei Konvektionstrocknern wird die Trocknungsenergie durch Brennerabgas oder erhitzte Luft auf das Trockengut übertragen. Sie zeichnen sich u. a. durch teilweise hohe Temperaturen des Heizmediums von bis zu 600 °C aus.

### 5.2.3.2 Kontakt-trockner

Bei Kontakt-trocknern wird die Wärme über beheizte Flächen auf den zu trocknenden Schlamm übertragen. Die Temperaturen des Heizmediums liegen bei 170 - 200 °C.

### **5.2.3.3 Strahlungstrockner**

Bei Strahlungstrocknern wird die notwendige Wärme durch Infrarotlicht, Elektromagnetismus oder durch Sonnenenergie bereitgestellt. Da in Bayern von den genannten Strahlungstrocknern lediglich die letztgenannten im Einsatz sind, werden nur diese näher betrachtet.

Bei der rein solaren Trocknung wird der Klärschlamm mit Hilfe der Sonnenstrahlung in Hallen mit Glas- oder transparenten Kunststoffaußenhüllen getrocknet.

Der Trocknungsvorgang erfolgt dabei mit Hilfe von Strahlungs- sowie Konvektionsenergie. Der Klärschlamm wird kontinuierlich umgewälzt, um das im Schlamm gebundene Wasser mit der Außenluft in Kontakt zu bringen und die Entstehung anaerober Zonen zu vermeiden.

Die Zuführung von zusätzlicher Heizenergie – ausnahmslos Abwärme – ist grundsätzlich möglich und bei Neuanlagen mittlerweile die Regel. In diesem Fall spricht man von solarunterstützten Trocknungsanlagen. Hierbei kann die Wärmeenergie sowohl durch Einblasen von warmer Luft in die Trockenhalle als auch durch Beheizung des Hallenbodens erfolgen.

Tab. 2: Beschreibung verschiedener Trocknersysteme mit Vor- und Nachteilen (nach (DWA 2004) mit Ergänzungen)

System	Verfahrensmerkmale	Vorteile	Nachteile
<b>Konvektions-trockner</b> – Bandtrockner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufgabevorrichtung/Formpresse zur Herstellung von Granulaten: das Granulat lässt sich zu einem gut durchlüftbaren Haufwerk verteilen.</li> <li>• Aufgabe auf perforiertes Trocknerband (siehe Abb. 7)</li> <li>• Die Trocknungsluft durchströmt den Schlamm im Produktraum und gibt die Wärme an den zu trocknenden Klärschlamm ab. Im Umluftraum wird der Trocknungsluft wieder Wärme zugeführt.</li> <li>• Trocknungsluft: 120 – 150 °C</li> <li>• Niedertemperatur- oder Kaltlufttrockner: &lt; 50 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unproblematische Leimphase</li> <li>• Produktqualität gut einstellbar</li> <li>• Geringer Verschleiß</li> <li>• Schnelles An-/Abfahren</li> <li>• Bei Niedertemperaturtrockner Abwärmenutzung möglich.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pelletierung notwendig</li> <li>• Aufwendungen wegen Brand- und Explosionsgefahr</li> <li>• Bei hohen Temperaturen begrenzte Abwärmenutzung möglich.</li> <li>• Bei Niedertemperaturtrocknern hohe Abluftmengen.</li> <li>• Hoher Aufwand für notwendige Abluftreinigung.</li> </ul>
<b>Konvektions-trockner</b> – Wirbelschicht-trockner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trocknung durch Erzeugung einer Wirbelschicht durch Einblasen von warmer Luft.</li> <li>• Temperatur in der Wirbelschicht: ca. 85 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unproblematische Leimphase</li> <li>• Geringe Abgasmengen</li> <li>• Schnelles An-/Abfahren</li> <li>• Wärmeübergang sehr gut</li> <li>• Produktqualität gleichmäßig</li> <li>• Wenig Verschleiß, da keine bewegten Teile</li> <li>• Staubfreies Trockengut</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Druckverlust und damit verbunden relativ hoher energetischer Aufwand zur Erzeugung der Wirbelschicht</li> </ul>
<b>Kontakt-trockner</b> – Dünnschicht-trockner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Horizontaler, beheizter Hohlzylinder</li> <li>• Innenrotor mit Förder- und Mischelementen, der ebenfalls beheizt wird.</li> <li>• Verteilung mittels Rotor auf die Zylinder-Innenwände</li> <li>• Temperatur: ca. 170 °C bis 200 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Unempfindlich gegenüber schwankenden TR-Gehalten</li> <li>• Unproblematische Leimphase</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Großes Bauvolumen bei Volltrocknung (nicht bei Kombination von Dünnschicht- mit Scheibentrockner)</li> </ul>
<b>Kontakt-trockner</b> – Scheiben-trockner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trocknung durch Kontakt mit Heizflächen (doppelwandige beheizte Scheiben auf horizontaler Hohlwelle)</li> <li>• Temperatur: ca. 170 °C bis 200 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Guter Wärmeübergang</li> <li>• Kompakte Bauweise</li> <li>• Hoher Durchsatz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Chargenbetrieb ungünstig</li> <li>• Rückmischung erforderlich</li> <li>• U. U. hoher Staubanteil im getrockneten Klärschlamm</li> </ul>
<b>Strahlungstrockner</b> – Solartrockner	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trocknung durch flächige Ausbringung in Trockenhallen (Schütthöhe i. d. R. bis 0,3 m) (siehe Abb. 8)</li> <li>• Kontinuierliche oder diskontinuierliche Wendeverfahren</li> <li>• Be- und Entlüftungseinrichtungen werden in Abhängigkeit von der Luftfeuchte in der Trockenhalle gesteuert.</li> <li>• In der Regel wird für solare Trocknungsanlagen entwässerter Klärschlamm eingesetzt. Es gibt auch Anlagen, in denen Nassschlamm getrocknet wird, allerdings ist hier der Platzbedarf aufgrund der großen Menge des zu verdampfenden Wassers entsprechend groß oder die behandelbaren Mengen entsprechend gering.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einfache, robuste Technik (abhängig vom Modell, solarunterstützte Anlagen sind verfahrenstechnisch ebenfalls relativ aufwändig)</li> <li>• Geringe Betriebskosten, wenn keine Abgasreinigung erforderlich ist.</li> <li>• Unproblematische Leimphase</li> <li>• Bei rein solaren Anlagen ist keine zusätzliche Trocknungsenergie notwendig.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hoher Flächenbedarf</li> <li>• Trocknungsleistung bei rein solaren Anlagen witterungsabhängig (Speicherbedarf für sonnenarme Jahreszeiten)</li> <li>• Lange Trocknungszeiten und keine Volltrocknung bei rein solarer Trocknung</li> <li>• Bei Abluftreinigung müssen sehr große Luftmengen gereinigt werden.</li> <li>• Ohne Abluftreinigung relativ hohe Ammoniakfrachten und u. U. Geruchsimmissionen</li> <li>• Kunststoffhüllen anfällig gegenüber Windlast</li> <li>• Geringere Heizwerte bei anschließender thermischer Behandlung</li> </ul>



Abb. 7: Trocknerband mit Klärschlamm-Presslingen



Abb. 8: Solarunterstützte Klärschlamm-trocknung



Solare und solarunterstützte Trockner werden in der einschlägigen Fachliteratur bislang nicht so ausführlich behandelt wie die etablierten Trocknerarten. Im Folgenden werden deshalb noch Gesichtspunkte dieser Anlagenart kurz betrachtet, die für eine Entscheidung für diese Anlagenart wesentlich sein können.

### Saisonbetrieb der solaren Trocknung

Die rein solare Trocknung ist naturgemäß stark jahreszeitenabhängig. 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.

Eine technisch mögliche – jedoch in der Praxis noch nicht getestete Variante – könnte die o. g. Nachteile eventuell vermeiden. Die Idee ist dabei, in einem ersten Schritt eine rein solare Trocknung bis zu einem Trocknungsgrad von 55 – 60 % TR durchzuführen. Dies ist auch bei ungünstiger Witterung mit überschaubarem Zeitaufwand möglich. Um eine ganzjährig gleichbleibende und zügige Trocknungsleistung zu gewährleisten, könnte der vorgetrocknete Schlamm z. B. mittels eines Niedertemperatur-Bandrockners, auf den auch körniges Gut aufgegeben werden kann, bis zum angestrebten Endtrocknungsgehalt getrocknet werden.

Diese Kombination hätte potentiell folgende Vorteile:

- Niedriges Emissionsniveau (v. a. Gerüche) der Vortrocknung durch rein solare Trocknung (Verzicht auf Abluftreinigung i. d. R. möglich)
- Ganzjährig ausschließliche Nutzung von Solarenergie bis zum Trocknungsgrad von 55 - 60 %
- Geringe Staubentwicklung in der Solartrocknung durch geringen Endtrockengehalt
- Überschreitung der Leimphase in der Solartrocknung. Dadurch keine Rückmischung im Bandrockner notwendig
- Optimierte Abwärmenutzung im Bandrockner im Vergleich zu solarunterstützten Anlagen
- Im Vergleich zu solarunterstützten Trocknern relativ geringe zu reinigende Abluftströme aus dem Bandrockner

### Abluftreinigung

Bei der Neuerrichtung solarunterstützter Trocknungsanlagen geht im Gegensatz zu den ersten Anlagen dieser Bauweise die Tendenz dahin, eine Abluftbehandlung vorzusehen, um insbesondere Belästigungen durch Geruchsmissionen auszuschließen und Ammoniakmissionen zu minimieren.

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

Ob eine Abluftreinigung nötig 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 dabei 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. Anaerob stabilisierter Klärschlamm ist dabei regelmäßig weniger geruchsinintensiv als aerob stabilisierter Schlamm. 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 Abluftreinigungsanlage installiert werden muss. Dies kann durch eine Immissionsprognose überprüft werden. Zur Beurteilung können u. a. die Vorgaben des Anhangs 1 der TA Luft sinngemäß herangezogen werden (TA LUFT 2002).

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 Geruchsimmissionsprognosen 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 zu beachten, dass die in der Geruchsimmissions-Richtlinie (GIRL), erarbeitet durch die Bund/Länderarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI), vorgegebenen Immissionsrichtwerte nicht durch eine Anlage alleine ausgeschöpft werden dürfen. Die GIRL (2009) ist in Bayern nicht verbindlich eingeführt, kann aber im Einzelfall als Erkenntnisquelle herangezogen werden.

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

Die in der TA Luft in Nr. 5.4.8.10.2 festgelegten Grenzwerte sind in jedem Fall einzuhalten.

#### **5.2.4 Vergleich der verschiedenen Verfahrensprinzipien**

Der Vorteil solarunterstützter Trockner gegenüber konventionellen Konvektions- oder Kontakt-trocknern liegt in der Reduzierung oder Ersetzung der notwendigen - über Feuerungsanlagen erzeugten - Wärmeenergie durch die Mitnutzung von Solarenergie. Dieser Vorteil ist jedoch dann nicht mehr von Relevanz, wenn Abwärme in ausreichender Menge vorhanden ist, 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.

### 5.2.5 Wärmerückgewinnung sowie Brüden- und Abluftbehandlung

Die mit Wasserdampf gesättigte Abluft 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.

Die auskondensierten Brüden werden normalerweise in der Abwasserbehandlungsanlage gereinigt.

Im Anschluss an die Kondensation der Brüden erfolgt bei thermischen Trocknern i. d. R. eine Entstaubung bzw. Partikelabscheidung durch einen Zyklon oder Gewebefilter. Im nächsten Schritt ist eine Nasswäsche der Abluft zur Entfernung von Ammoniak notwendig. Die so vorgereinigte Abluft kann z. B. 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.

Bei Solar- und Niedertemperaturtrocknern entstehen keine zu reinigenden Brüden. Aus diesem Grund kann jedoch die in den Brüden enthaltene Wärmeenergie auch nicht zurückgewonnen werden.

### 5.2.6 Wärmebedarf 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. Wärmepotentiale gehen jedoch bei Solartrocknern dadurch verloren, dass die im verdampften Wasser enthaltene Wärmeenergie nicht zurückgewonnen wird.

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. Eine Ausnahme von diesem Grundsatz ist die Nassschlamm-trocknung in solaren Trockneranlagen.

#### 5.2.6.1 Konvektions- und Kontaktrockner

Im Folgenden wird mit beispielhaften, jedoch praxisnahen Daten die benötigte Abwärmeleistung für die Trocknung von 10.000 t Klärschlamm von 25 auf 90 % TR berechnet (siehe Tab. 3).

Bei Konvektions- und Kontaktrocknern kann mit einem spezifischen Wärmebedarf von 0,9 – 1,2 kWh/kg H<sub>2</sub>O<sub>verdampft</sub> gerechnet werden. Im Einzelfall ist natürlich der jeweilige Wärmebedarf des in Frage stehenden Trockners zu verwenden.

Für das berechnete Beispiel kann eine Abwärmeleistung von etwa 850 kW als ausreichend angesehen werden. Saisonale Schwankungen in der Wärmeversorgung und der Witterungsverhältnisse sind zu berücksichtigen.

Tab. 3: Beispielhafte Berechnung der notwendigen Wärmeleistung bei Konvektions- und Kontakt Trocknern

spezifischer Wärmeverbrauch	<b>0,9</b> kWh/kg
Verfügbarkeit	8.500 h/a
TR-Gehalt Anfang	25 %
TR-Gehalt Ende	90 %
Masse KS 25 % TR	10.000 t/a
Masse KS 90 % TR	2.778 t/a
Masse Wasser <sub>verdampft</sub>	7.222 t/a
Wärmeverbrauch (= spezifischer Wärmeverbrauch • Masse Wasser <sub>verdampft</sub> )	6.500 MWh/a
Wärmeleistung (= Wärmeverbrauch / Verfügbarkeit)	765 kW
<b>Wärmeleistung + 10 % Sicherheit</b>	<b>841 kW</b>

Bei Konvektions- und Kontakt Trocknern kann das Ziel 850 KW nur von besseren Aggregaten erreicht werden.

### 5.2.6.2 Solarunterstützte Trocknung

Der Wärmebedarf bei der solarunterstützten Trocknung mit Abwärmenutzung wird teilweise über die Sonneneinstrahlung (ca. 20 - 30 %) gedeckt. Der überwiegende Anteil der benötigten Wärme wird z. B. über eine Fußbodenheizung zugeführt. Diese wird in den meisten Fällen mit Heißwasser betrieben, das über einen Wärmetauscher bereitgestellt wird. Die notwendige Abwärme stammt in der Regel aus dem Abgas eines Blockheizkraftwerks, kann aber auch über andere Wärmequellen (z. B. Heißdampf) auf den Warmwasserkreislauf der Fußbodenheizung übertragen werden.

Die Effektivität der Wärmenutzung ist bei der solaren Trocknung gegenüber den Konvektions- und Kontakt Trocknern nicht optimiert. Der spezifische Wärmebedarf ist daher etwas höher. Er beträgt 0,96 bis 1,20 kWh/kg H<sub>2</sub>O<sub>verdampft</sub>. Allerdings wird bei den Anlagenherstellern in der Regel von einem Anteil von 20 % Solarenergie ausgegangen. Zieht man diesen Anteil ab, so verbleibt für die benötigte Abwärme ein spezifischer Wärmebedarf von durchschnittlich 0,86 kWh/kg verdampftes Wasser.

Legt man die gleichen Daten wie oben beschrieben zu Grunde, resultiert bei Berücksichtigung eines Sicherheitspuffers von 10 % eine Wärmeleistung von fast 810 kW (siehe Tab. 4).

Saisonale Schwankungen in der Wärmeversorgung und der Witterungsverhältnisse sind hier verstärkt zu berücksichtigen.

Tab. 4: Beispielhafte Berechnung der notwendigen Wärmeleistung bei solarunterstützten Trocknern

spezifischer Wärmeverbrauch	<b>0,86</b> kWh/kg
Verfügbarkeit	8.500 h/a
TR-Gehalt Anfang	25 %
TR-Gehalt Ende	90 %
Masse KS 25 % TR	10.000 t/a
Masse KS 90 % TR	2.778 t/a
Masse Wasser <sub>verdampft</sub>	7.222 t/a
Wärmeverbrauch (= spezifischer Wärmeverbrauch • Masse Wasser <sub>verdampft</sub> )	6.211 MWh/a
Wärmeleistung (= Wärmeverbrauch / Verfügbarkeit)	731 kW
<b>Wärmeleistung + 10 % Sicherheit</b>	<b>804 kW</b>

Bei solarunterstützten Trocknern kann davon ausgegangen werden, dass ein Aggregat mit mittlerem Wirkungsgrad das Ziel 850 KW erfüllen wird.

## 6 Entsorgungswege für Klärschlamm

Da die bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen keinen zukunftsfähigen Entsorgungsweg darstellt, sind alternative Entsorgungswege erforderlich. In den folgenden Kapiteln werden Techniken zur Klärschlamm Entsorgung beschrieben, die sich in den letzten Jahren bewährt haben oder teilweise noch in Entwicklung sind. Der Überblick erhebt bezüglich aller auf dem Markt angebotenen Technologien keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

### 6.1 Mitverbrennung

#### 6.1.1 Kohlekraftwerk

Die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken ist derzeit eine gängige Alternative für die Entsorgung von Klärschlamm. Dabei wird der Energieinhalt des Klärschlamm genutzt. In Bayern steht hier das Kohlekraftwerk Zolling der ENGIE Deutschland AG im Landkreis Freising zur Verfügung. Jährlich werden in diesem Kraftwerk ca. 4.000 - 5.000 t entwässerter Klärschlamm mitverbrannt.

Der mit LKWs angelieferte entwässerte Klärschlamm wird über geschlossene Fördersysteme und Silos zu der Kohlemühle 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 wieder 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 Stand der Technik und wird bereits in vier bayerischen Zementwerken durchgeführt. Zementwerke nehmen Klärschlamm in aller Regel nur vollgetrocknet, d. h. mit einem TR-Gehalt von über 90 % an. Klärschlamm, der nur mechanisch entwässert ist, würde den Brennprozess im Drehrohrofen beeinträchtigen. Daher ist eine thermische oder solarunterstützte Trocknung erforderlich. Manche Zementwerke betreiben einen eigenen Klärschlamm Trockner, so dass auch entwässerter Klärschlamm angeliefert werden kann. Nach dem Trockenvorgang wird der Klärschlamm gemahlen und anschließend pneumatisch in die Hauptfeuerung eingeblasen.

Die brennbaren Bestandteile des Klärschlamm ersetzen fossile Primärbrennstoffe (i. d. R. Steinkohle, Braunkohle) für den bei ca. 1.450 °C ablaufenden Brennprozess zur Klinkerherstellung. Die Emissionen von fossilem CO<sub>2</sub> werden somit vermindert.

Neben dem Energieinhalt des getrockneten Klärschlamm werden auch die nicht brennbaren, anorganischen Bestandteile des Klärschlamm – insbesondere Silizium, Aluminium-, Eisen- und Calciumoxide – in die Klinkermatrix eingebunden und damit verwertet.

Damit die Zementqualität nicht abnimmt, ist die maximal verbrennbare Menge von Klärschlamm auf ca. 5 % der Klinkermenge beschränkt (QUICKER 2008). Beim Einsatz von Klärschlamm in Zementwerken ist der hohe Phosphorgehalt limitierend, da er die Qualität des Zements beeinträchtigt. Außerdem ist eine Nutzung der Ressource Phosphor nicht möglich. Zusätzlich ist, bei Anwendung der ab 2029 geltenden neuen §§ 3a bis 3f der ABFKLÄRV (2017), ab 2029 die Mitverbrennung nicht gesichert. Daher sollte dieses Verfahren nur bei Klärschlämmen erwogen werden, die bereits niedrige Phosphor-

gehalte < 20 g P/kg TM haben oder bei denen vorab eine Phosphorrückgewinnungsmaßnahme durchgeführt wurde. Hierzu wurde auf der Kläranlage Neuburg a. d. Donau ein Pilotprojekt betrieben (siehe Kapitel 7.3.1 „P-RoC-Verfahren“).

Tab. 5: Bayerische Zementwerke mit Klärschlammverbrennung

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

Bei Zementwerken ist der Quecksilbergehalt im Klärschlamm auf z. B. 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.

Bei der Erstellung eines regionalen Entsorgungskonzeptes ist zu berücksichtigen, dass Zementwerke i. d. R. im Winterhalbjahr lange Revisions- und Produktionsstillstandszeiten haben. Für diese Zeit muss eine ausreichende Zwischenlagerkapazität vorhanden sein.

### 6.1.3 Müllheizkraftwerk

Manche 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 in einer Anlage beträgt wenige Prozent.

Müllheizkraftwerke werden ab 2029 wie Zementwerke 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 Monoverbrennungsanlagen besitzen eigene Trocknungsanlagen, so dass auch entwässerter Klärschlamm angeliefert werden kann.

In Bayern werden folgende Monoverbrennungsanlagen betrieben:

Tab. 6: Technische Konzeptionen von Monoverbrennungsanlagen in Bayern

Betreiber	Vortrocknung	% TR	Verbrennungsprinzip	Kapazität t TM/a
Münchner Stadtentwässerung	Scheibentrockner	45	Wirbelschicht	ca. 24.000
ZV Klärwerk Steinhäule, Neu-Ulm	Dünnschichttrockner	40	Wirbelschicht	ca. 24.000
InfraServ GmbH & Co. Gendorf KG	Scheibentrockner	50	Wirbelschicht	10.000
Fa. Emter Altenstadt, Schongau	Kaskadentrockner	70	Rostfeuerung	45.000

In Straubing existiert ein Stadtratsbeschluss für eine Klärschlammmonoverbrennungsanlage.

### 6.2.1 Wirbelschichtverbrennungsanlagen

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 ca. 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 ca. 24.000 t TM/a. Die Verbrennungslinien werden alternierend betrieben. Die Klärschlammverbrennungsasche wird zurzeit als Deponiebaumaterial verwertet. Eine landwirtschaftliche Nutzung ist aktuell nicht vorgesehen.

Ebenso betreibt der *Zweckverband Klärwerk 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 ca. 40 % getrocknet. Zum Einsatz kommt neben betriebseigenem, nicht ausgefautem Klärschlamm auch ausgefauter Klärschlamm aus Kläranlagen der Region. Die Anlage verfügt über zwei parallele Verbrennungslinien mit einer Jahreskapazität von insgesamt ca. 24.000 t TM/a. Die Klärschlammverbrennungsasche wurde bis 2018 zum Teil in der Düngemittelindustrie verwertet.

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 ca. 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.

In Straubing plant die SER GmbH eine Wirbelschichtverbrennung. Der jährliche Durchsatz wurde auf 120.000 t entwässertem Klärschlamm projektiert, dies entspricht 35.000 - 40.000 t TM. Ein Bürgerentscheid hat die Planung gestützt, es wird mit der Inbetriebnahme der Anlage 2023 gerechnet. Die aktuelle Planung sieht die Möglichkeit der Phosphorrückgewinnung vor.

### 6.2.2 Rostfeuerungsanlage der Fa. Emter GmbH

In Altenstadt bei Schongau betreibt die Fa. Emter GmbH (Fa. Emter) seit 2009 privatwirtschaftlich eine Klärschlamm-Monoverbrennungsanlage mit Rostfeuerung (siehe Abb. 9). Die jährliche Kapazität beträgt ca. 45.000 t TM. 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.



Abb. 9: Klärschlamm-monoverbrennungsanlage der Fa. Emter

Die Trocknung der Schlämme auf ca. 70 % TR erfolgt in einem Kaskadentrockner. Die für die Trocknung erforderliche Wärme wird dem Abhitzekeessel über einen Thermalölkreislauf entnommen.

Die Anlage besteht aus zwei baugleichen Verbrennungslinien mit jeweils 6 MW Gesamtfeuerleistung und einer gemeinsamen Abgasreinigung (siehe Abb. 10).

Die Verbrennungsasche wurde bis Anfang 2018 ohne weitere Aufbereitung an die Düngemittelindustrie zur Herstellung eines vermarktbaren Düngers abgegeben. Somit gelangen der wertvolle Phosphor, jedoch ggf. auch die Schwermetalle, zurück in den landwirtschaftlichen Nährstoffkreislauf. Die Grenzwerte der ABFKLÄRV (2017) werden dabei eingehalten.

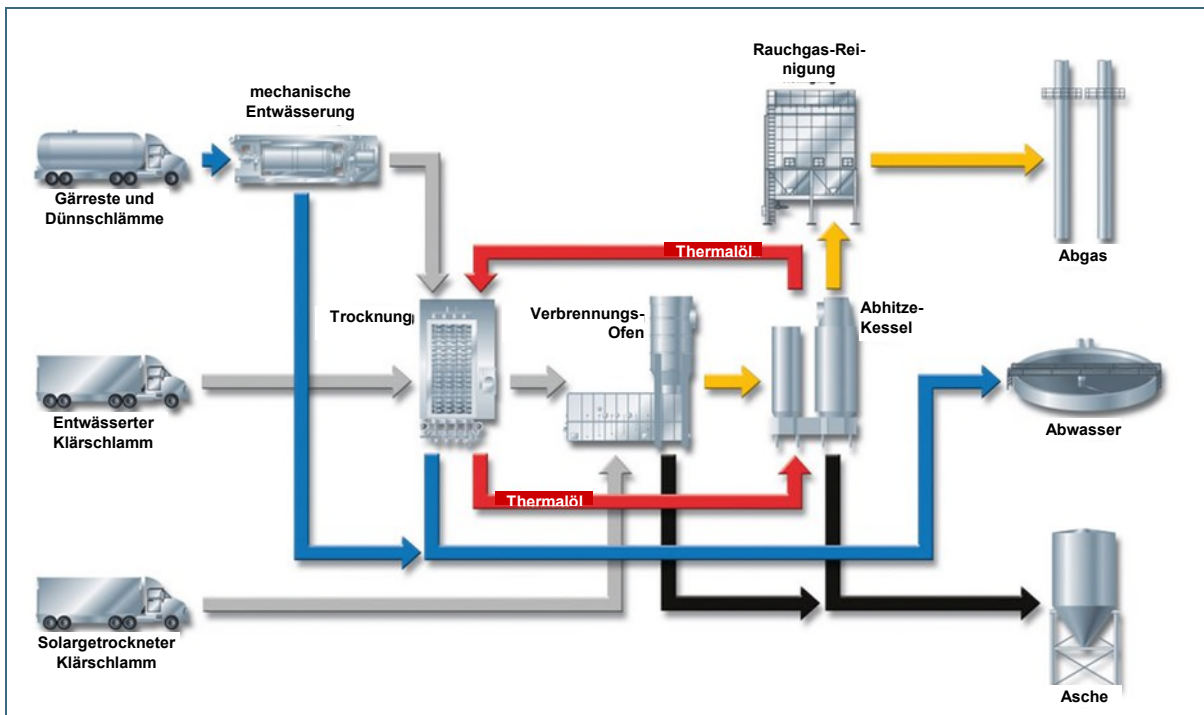


Abb. 10: Verfahrensschema der Klärschlammverbrennungsanlage der Fa. Emter

## 6.3 Vergasungs- und Pyrolyseverfahren

### 6.3.1 Vergasungsverfahren der Fa. SÜLZLE Kopf SynGas GmbH & Co. KG

Die Fa. SÜLZLE KOPF Syngas Klärschlammverwertung bietet einen Vergasungsreaktor (siehe Abb. 11) an, in dem in einer stationären Wirbelschicht unter Sauerstoffmangel (unterstöchiometrisch) und bei Temperaturen von bis zu ca. 900 °C aus dem getrockneten Klärschlamm (80 - 90 % TR) ein brennbares Gas entsteht.

Dieses Gas wird in der Rohgasquenche abgekühlt und dann durch Filtern und Trocknen weiter aufbereitet. In einem Blockheizkraftwerk wird das Gas zu Strom und Wärme umgewandelt. Alternativ kann mit Hilfe einer Brennkammer ein größerer Anteil der Wärme für die Trocknung des Klärschlammes genutzt werden.

Nach einer Verweilzeit von etwa 30 Minuten im Reaktor verbleibt vom Klärschlamm nur noch ein inertes Granulat. Nach Angaben des Herstellers soll das mineralische Granulat die Anforderungen für einen Einbau in technischen Bauwerken ohne zusätzliche Sicherungsmaßnahmen erfüllen. Es soll ggf. als Zuschlagstoff zur Herstellung von Asphalt und als Material im Straßen- und Tiefbau verwendet werden.



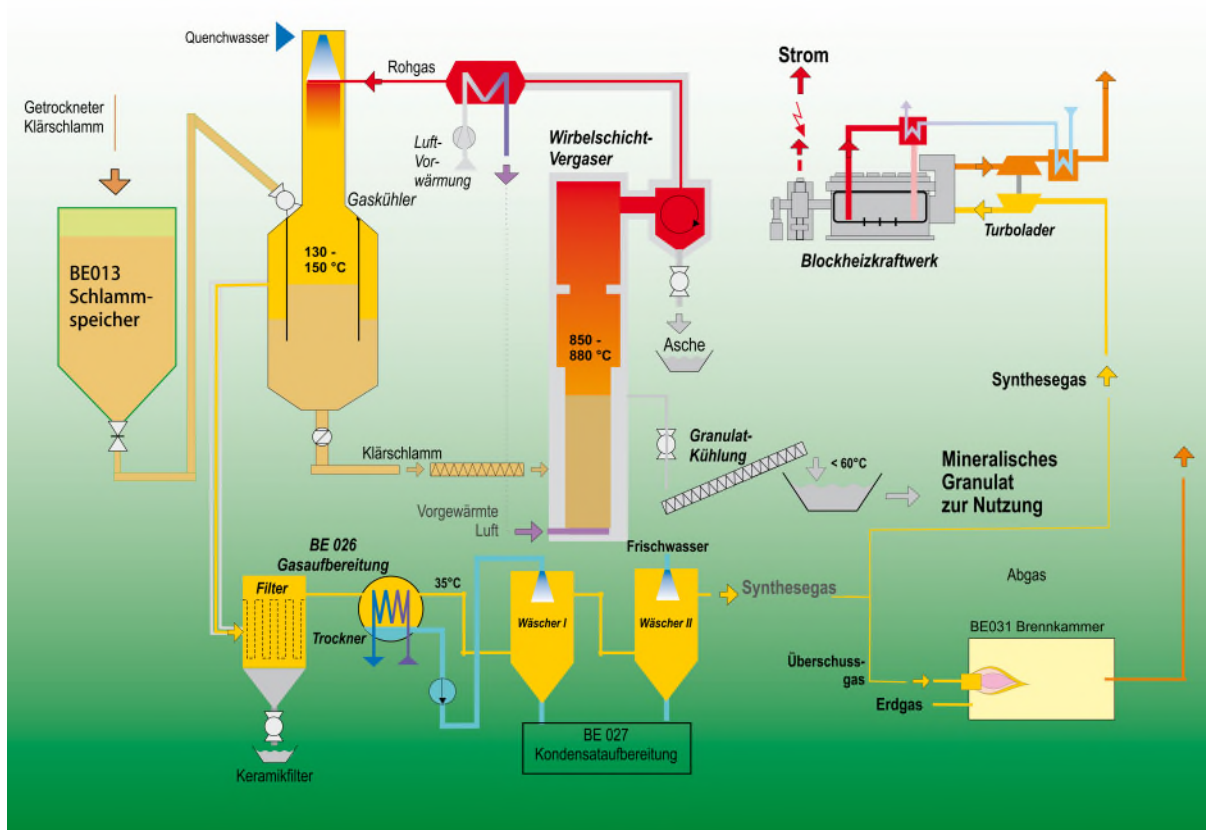


Abb. 11: Verfahrensschema Klärschlammvergasungsanlage der Fa. SÜLZLE Kopf SynGas Klärschlammverwertung

Der Zweckverband Abwasserreinigung Balingen (BW) betreibt auf der Kläranlage Balingen seit 2002 eine Pilotanlage. Nach einem Umbau ist sie 2011 mit erhöhter Kapazität (ca. 2.000 t TM/a) wieder als Entsorgungsanlage auch für die Region in Betrieb gegangen.

Beim Klärwerk Mannheim (BW) wurde im November 2010 eine Vergasungsanlage dieses Typs in Betrieb genommen. In der ersten Ausbaustufe beträgt die Kapazität ca. 5.000 t TM/a. Weiterhin ist am Klärwerk Koblenz eine Anlage geplant. Sie wird auf ca. 4.000 t TM/a ausgelegt.

### 6.3.2 Pyrobustor® der Fa. Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG

Im Pyrobustor® laufen die Verfahrensschritte Pyrolyse und Verbrennung nacheinander ab (siehe Abb. 12). Der Klärschlamm wird dabei zu einer deponiefähigen Asche unter Freisetzung von Energie umgesetzt. Er gelangt zunächst über die Materialaufgabe in die Pyrolysekammer, in der das Pyrolysegas entsteht. Danach wird in der direkt anschließenden zweiten Kammer der entstandene Pyrolysekoks verbrannt. Die anfallende Asche wird in Richtung Ascheaustrag gefördert.

Das bei der Verbrennung entstehende Rauchgas wird durch einen Ringspalt an der Pyrolysekammer vorbeigeführt und gibt dabei einen Teil seiner Wärmeenergie an diese ab. Der Wärmebedarf der dort ablaufenden Pyrolyse wird dadurch gedeckt.

Das erzeugte heizwertreiche Pyrolysegas wird zusammen mit dem über einen Zyklon vorgereinigten – noch nicht vollständig oxidierten – Rauchgas in einer Nachbrennkammer verbrannt. Das heiße Abgas aus der Nachbrennkammer wird zur Wärmeauskopplung genutzt. Die gewonnene Wärme dient entsprechend den individuellen Betriebsverhältnissen z. B. zur Dampferzeugung, zur Heißwasserbereitung oder auch zur Erwärmung von Thermoöl, das den vorgeschalteten Klärschlamm-trockner beheizt (EISENMANN GMBH & CO. KG 2011).

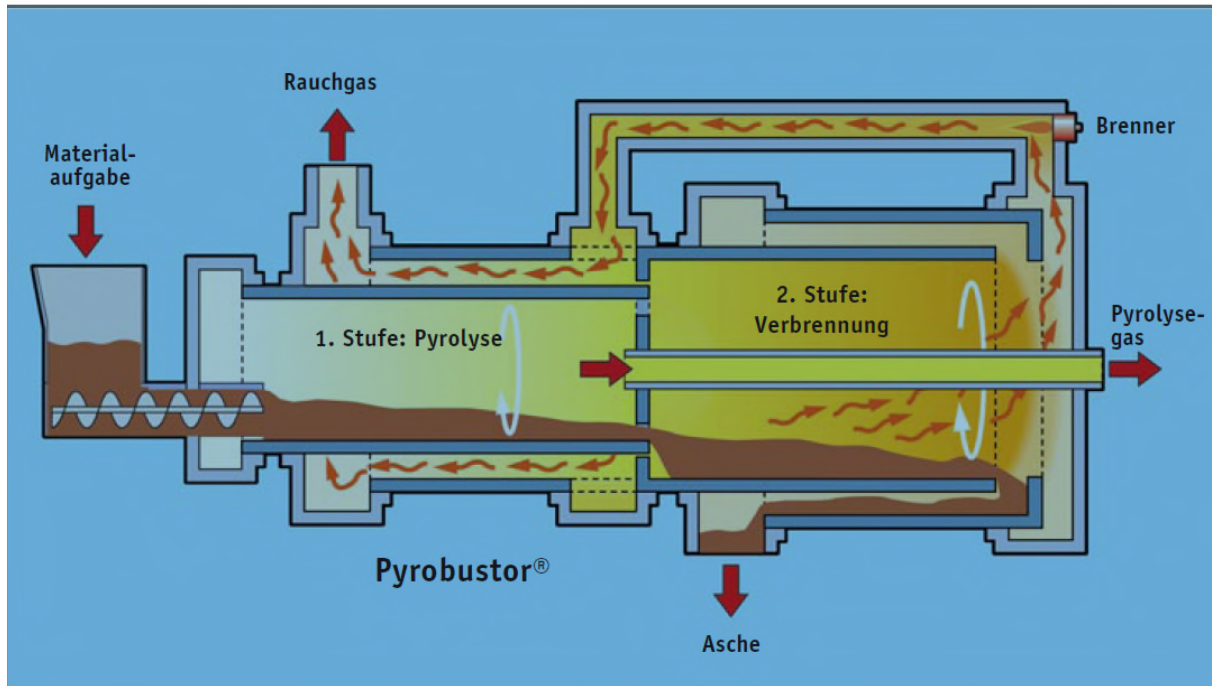


Abb. 12: Funktionsprinzip des Pyrobustors® der Fa. Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG

Der Pyrobustor® ist auf die dezentrale Abfallentsorgung ausgelegt und kann ab einem Durchsatz von 400 kg TM/h eingesetzt werden.

Seit 2005 wird der Klärschlamm von 14 Gemeinden im südtiroler Pustertal in einer Pyrobustor®-Anlage entsorgt. Die Inbetriebnahme einer weiteren Anlage war vorgesehen. Die Anlage konnte nie in einen kontinuierlichen Betrieb übergeführt werden.

### 6.3.3 Pyreg-Verfahren

Beim Pyreg-Verfahren wird Klärschlamm in einem Doppelschneckenreaktor durch Pyrolyse bei 500 – 800 °C karbonisiert. Das Verfahren plant mit einem Durchsatz von 700 t TM/a pro Pyrolyseeinheit. In Deutschland werden zwei Anlagen, in Linz-Unkel seit 2015 und in Homburg seit 2016, betrieben.

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.

Das Karbonisat wird nach Austrag mit Wasser gekühlt. Es soll laut Hersteller direkt als Dünger verwendet werden und die Grenzwerte der ABFKLÄRV (2017) und der DÜMV (2017) einhalten.

## 7 Ressourcenschonung

### 7.1 Allgemeines zur Ressource Phosphor

Phosphor ist ein essentielles Element und für Lebensvorgänge unentbehrlich. Nach DECHEMA E.V. VDI (2017) und U.S. GEOLOGICAL SURVEY (2018) beträgt die geschätzte statische Reichweite der erschlossenen Phosphorressourcen ca. 300 Mrd. Tonnen oder ca. 1.000 Jahre. Die statische Reichweite der Phosphorreserven, also der derzeit wirtschaftlich abbaubaren Vorkommen, liegt derzeit bei ca. 300 Jahren. Ca. 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. Der Abbau der Phosphorerze und die Erzaufbereitungsprozesse sind mit einem beträchtlichen Aufwand verbunden (u. a. Einsatz großer Mengen an Schwefelsäure) (DECHEMA E.V. VDI 2017).

Deutschland muss den benötigten mineralischen Phosphor in vollem Umfang importieren. Die größten Rückgewinnungspotenziale für die Ressource Phosphor sind bei den biogenen Reststoffen Abwasser, Klärschlamm und Tiermehl vorhanden. In Deutschland wurde eine Reihe von Projekten initiiert, um die Möglichkeiten der Rückgewinnung von Phosphor aus diesen sekundären Quellen zu untersuchen (z. B. BMU/BMBF- Förderinitiative „Kreislaufwirtschaft für Pflanzennährstoffe – insbesondere Phosphor“). Bayern hat außerdem zusammen mit anderen Bundesländern und dem BMU eine Phosphor-Recycling-Strategie für Deutschland in die Wege geleitet.

Die Preise für Phosphatdünger unterliegen starken Schwankungen und korrelieren mit den Phosphatgesteinspreisen. Das bisher höchste Preisniveau für Phosphorgestein wurde 2007/2008 erreicht. Seit 2014 liegt der Preis ca. beim doppelten Niveau der Jahre 1980 bis 2005. Ab dem Jahr 2015 ist ein sinkender Preis zu beobachten (STATISTA GMBH, WORLD BANK 2018). Auf Grund der teils geopolitisch kritischen Lage der Herkunftsländer und der Verunreinigung mit Schwermetallen des Rohphosphates ist eine Nutzung von sekundären Phosphorquellen (Klärschlamm, Abwasser, Tiermehl usw.) anzustreben.

### 7.2 Phosphor-Potenziale im Abwasser und Klärschlamm

Grundsätzlich lässt sich Phosphor aus Abwasser, Klärschlamm, Prozesswässern der Schlammbehandlung sowie Klärschlammaschen zurückgewinnen. Hierzu gibt es eine Reihe technischer Verfahren, die bereits großtechnisch umgesetzt wurden, aber auch eine Vielzahl, die sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium befinden und sich wegen der hohen Kosten bisher am Markt nicht durchsetzen konnten. Derzeit ist ein Trend hin zu Verfahren, die auf eine Phosphorrückgewinnung aus den Klärschlammaschen basieren, zu beobachten (STEINMETZ 2016).

Das Phosphorpotenzial im bayerischen kommunalen Klärschlamm liegt je nach Klärschlammaufkommen oder P-Gehalt bei ca. 7.000 bis 10.000 Mg P/Jahr (BAYERISCHES KLÄRSCHLAMMNETZ 2017, LAGA 2015, UMWELTBUNDESAMT 2018). Es liegt damit deutlich über dem Phosphorpotenzial des Tiermehls und des Fleischknochenmehls sowie der derzeit in Bayern gesammelten und einer Verwertung zugeführten Bioabfälle und Grünabfälle. Für die Rückgewinnung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors gibt es nasschemische und thermische Verfahrensentwicklungen. Die voraussichtlichen Recyclingquoten aus dem Abwasser oder Schlammwasser liegen zwischen 30 bis 50 %, aus dem Klärschlamm bei 60 bis 90 % und aus Aschen um die 90 %, jeweils bezogen auf die Zulauffracht im Abwasser (LAGA 2015).

## 7.3 Verfahren zur Rückgewinnung von Phosphor

Im Folgenden wird eine Auswahl an Verfahren zur Rückgewinnung des Phosphors aus Abwasser, Prozesswässern sowie aus Klärschlamm und Klärschlammaschen kurz beschrieben. Die Informationen beruhen im Wesentlichen auf Angaben in DEUTSCHE PHOSPHOR PLATTFORM (2018), HOLM et al. (2018), LFU/LUBW (2010), ATZ ENTWICKLUNGSZENTRUM (2009). Es werden im Nachfolgenden nur Verfahren aufgeführt, für die bei der Erstellung der Planungshilfe bereits eine gewisse Praxis- oder Planungsreife belegt wurde. Es existieren noch viele andere Verfahren, die aber die Anwendungsreife noch nicht nachgewiesen haben.

### 7.3.1 Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasser und Schlammwasser

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 in der Abwasserbehandlung. Daher kann das Problem entstehen, dass wenn nach der P-Rückgewinnung in der Abwasserbehandlungsanlage immer noch P-Gehalte  $\geq 20$  g/kg TM im erzeugten Klärschlamm vorliegen, eine weitere P-Rückgewinnung erforderlich ist. Es muss daher ausreichend sichergestellt sein, dass nach einer Behandlung im Abwasser die P-Gehalte  $< 20$  g/kg TM im Klärschlamm liegen.

#### OSTARA's PEARL®-Verfahren

Die Abscheidung von MAP (Magnesium-Ammonium-Phosphat, Struvit) erfolgt bei diesem Verfahren in Kristallisationstürmen, in denen Filtratwasser aus der Faulschlammmentwässerung mit Natronlauge und Magnesiumchlorid versetzt wird. Das ausgefällte MAP wird nach Trocknung als Dünger mit der Handelsbezeichnung Crystal Green® vermarktet. Die Fa. OSTARA betreibt in Nordamerika derartige großtechnische Kristallisationsanlagen. Derzeit sind weltweit 14 Referenzanlagen in Betrieb.

#### P-RoC®-Verfahren

Mit dem P-RoC-Verfahren (Phosphorus Recovery from Waste Water by Crystallization of Calcium Phosphate Compounds) lässt sich im Abwasser oder Schlammwasser gelöstes Phosphat mittels Kristallisation an Calcium-Silicat-Hydrat-Phasen (CSH) in einem Rührreaktor als Calcium-Phosphat zurückgewinnen. Das P-RoC-Produkt weist eine hohe P-Wasserlöslichkeit auf.

Nach den erfolgreich verlaufenen Versuchen auf der Kläranlage Neuburg a. d. Donau durch die Stadt Neuburg, das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die Fa. Circel GmbH&Co. KG und die Fa. HeidelbergCement ist eine großtechnische Umsetzung geplant (LFU 2017). Derzeit ist eine weitere Pilotanlage an der Kläranlage Bachgau, Großostheim, in Betrieb.

#### ExtraPhos

Beim ExtraPhos-Verfahren wird der Klärschlamm bei einem Druck von ca. 10 bar mit Kohlendioxid versetzt, dadurch sinkt der pH-Wert auf 4,5 bis 5,5 und ein Teil der Phosphate wird mobilisiert. Bei der anschließenden Fest-/Flüssig-Trennung werden die Klärschlammteilchen von der flüssigen Phase getrennt. Das Kohlendioxid geht nach Druckabsenkung in die Gasphase über, wird abgezogen und dem Prozess im Kreislauf erneut zugeführt. Das Schlammwasser wird anschließend dem dritten Prozessschritt, der Phosphatfällung, zugeführt. Hierbei werden die gelösten Phosphate, mit Hilfe von geringen Mengen Kalkmilch, als Calciumphosphat ausgefällt. Nach Abtrennung, optionaler Trocknung und Granulierung können die Calciumphosphate als Düngemittel eingesetzt werden. Das erzeugte Produkt ist schadstofffrei und bereits als Dünger zugelassen. Eine mobile Pilotanlage ist seit 2017 in Betrieb.

### 7.3.2 Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm

#### AirPrex® / MAP-Verfahren

Der Faulschlamm wird bei diesem Verfahren einem mehrstufigen Reaktorsystem zugeführt und einer Luftstrippung unterzogen. Durch das Ausgasen von Kohlendioxid steigt der pH-Wert an, und nach Zugabe von Magnesiumchlorid wird Phosphor als MAP ausgefällt. Das MAP wird abzentrifugiert und als Dünger verwertet. Eine Zulassung des MAP als Düngemittel ist erfolgt. Dieses Verfahren kann eine sinnvolle Ergänzung der vermehrten biologischen Phosphorelimination auf Kläranlagen darstellen. Ursprünglich wurde das Verfahren von den Berliner Wasserbetrieben entwickelt, um Inkrustationsprobleme durch spontane MAP-Bildung bei der Schlammbehandlung zu lösen. Es ist mittlerweile auf neun Abwasserbehandlungsanlagen (Berlin, Mönchengladbach, München usw.) großtechnisch installiert.

#### NuReSys-Verfahren

Das NuReSys-Verfahren kann zur Behandlung von Filtrat nach der Schlammentwässerung oder direkt zur Behandlung von ausgefaultem Schlamm eingesetzt werden. Das Verfahren arbeitet ähnlich wie das AirPrex-Verfahren mit einem Air-Stripper. Der Unterschied besteht darin, dass die eigentliche Kristallisation von MAP in einem separaten Reaktor durch die Zugabe von Magnesiumchlorid erfolgt. Eine Referenzanlage im großtechnischen Maßstab steht in Leuven, Belgien, KLÄRWERK GÖPPINGEN (2014).

#### Stuttgarter Verfahren der Phosphorrückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm als Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP)

Bei diesem Verfahren wird der im anaerob stabilisierten Klärschlamm (Faulschlamm) enthaltene Phosphor mittels Schwefelsäure zurückgelöst und die flüssige Phase über eine Kammerfilterpresse abgetrennt. Anschließend werden störende Metallkationen komplexiert. Durch Zugabe von Natronlauge wird dann der pH-Wert auf 8,5 angehoben und der Phosphor mittels Magnesiumchlorid als MAP ausgefällt. Dadurch enthält man ein phosphorhaltiges Produkt mit geringer Schwermetallbelastung. Das Verfahren wurde durch die Universität Stuttgart, Institut für Siedlungswasserbau Wassergüte- und Abfallwirtschaft, entwickelt und wurde seit 2011 zur Erprobung im technischen Maßstab auf der Kläranlage Offenburg-Griesheim installiert. Zukünftige Arbeiten sollen die Wirtschaftlichkeit optimieren.

#### MSE- Verfahren

Eine Variante des „Stuttgarter Verfahrens“ stellt das MSE-Verfahren dar. Die MSE-Phosphor-Rückgewinnungsanlage ist eine mobile Versuchsanlage (verbaut in zwei Hochsee-Containern), welche direkt auf einer Kläranlage eingesetzt werden kann. Hinsichtlich einer höheren Produktqualität wird das Filtrat mit einer Ultrafiltration nochmals aufgereinigt. Dieses Produkt wird getrocknet, zu Kügelchen granuliert und kann anschließend in der Landwirtschaft als Düngemittel eingesetzt werden. Analysen des Produktes weisen einen hohen  $P_2O_5$ -Gehalt aus und sehr geringe Schadstoffkonzentrationen bei gleichzeitig sehr hoher Pflanzenverfügbarkeit. Die mobile Versuchsanlage wurde bereits auf mehreren Kläranlagen betrieben.

#### Mephrec-Verfahren

Maschinell entwässerter oder getrockneter Klärschlamm wird (ggf. unter Zusatz von Zement) brikiert und gemeinsam mit Koks unter reduzierenden Bedingungen bei Temperaturen bis 2.000 °C einer Schmelzvergasung in einem Schachtofen unterzogen. Es entsteht eine flüssige, P-haltige Schlacke, die abgestochen und im Wasserbad granuliert wird. Daneben wird eine Metalllegierung getrennt abgestochen, in der sich hoch schmelzende Schwermetalle (z. B. Fe, Cu, Cr, Ni) anreichern. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass die thermische Behandlung des Klärschlammes und das Phosphorrecycling in einem Verfahrensschritt realisiert werden können. Das Verbundforschungsvorhaben „Klärschlammverwertung Region Nürnberg mit metallurgischem Phosphorrecycling“ hat mittels einer Pilot-

anlage im Halbmaßstab das Verfahren von 2012 bis April 2018 erprobt. Derzeit besteht noch Optimierungspotential hinsichtlich des Energiebedarfs, der Abgasreinigung und der P-Rückgewinnungsquote (KSVN GMBH 2018).

#### **TerraNova®**

Ausgangsmaterial ist Frisch- oder Faulschlamm, der mechanisch entwässert und anschließend einer Hydrothermalen Carbonisierung (HTC) unterzogen wird. Die entstandene kohlehaltige Suspension wird anschließend auf  $\text{pH} < 2$  angesäuert, wodurch je nach Fällungsverfahren 70 – 90 % des Phosphors in die flüssige Phase übergehen. Die Suspension wird dann rein mechanisch in eine P-arme, regenerative Kohle ( $\text{TR} > 70\%$ ) und ein P-reiches Filtrat mit bis zu 80 % des im Ausgangsschlamm enthaltenen Phosphors separiert. Die Hersteller geben an, dass die P-arme Kohle nicht mehr den Anforderungen der Klärschlammverordnung unterliegt und ohne rechtliche Einschränkungen mitverbrannt werden kann, wodurch die Notwendigkeit der Monoverbrennung entfällt. Der im Filtrat als Phosphat gelöste Phosphor wird mit Calcium-Silikat-Hydrat kristallisiert und abgetrennt. Schwermetalle verbleiben aufgrund der starken Bindungskraft der Kohle im Wesentlichen dort enthalten und können im Bedarfsfall mit einer sulfidischen Fällung entfernt werden. Der Phosphor liegt nach der Kristallisation als Calciumphosphat-Silikat-Hydrat in einer gut pflanzenverfügbaren Form vor. Die Erfordernisse der Klärschlammverordnung hinsichtlich P-Rückgewinnung können nach Herstellerangaben erfüllt werden. Eine Pilotanlage für dieses Verfahren steht in Duisburg.

### **7.3.3 Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammaschen**

Prinzipiell ist auch eine Direktverwertung der Klärschlammaschen möglich. Dies ist der Fall, wenn die Grenzwerte der Düngemittelverordnung von der erzeugten Klärschlammasche eingehalten werden (DÜMV 2017). Die Direktverwertung wurde in Bayern bereits einige Jahre praktiziert. 2018 hat sich allerdings gezeigt, dass die i.d.R. kurzfristig geringe Pflanzenverfügbarkeit und auch ein sich verschlechterndes Image der Klärschlammaschen zu Absatzproblemen bei der Direktverwertung führen können. Es empfiehlt sich daher immer, eines der unten aufgeführten Verfahren mit in eine Planung einfließen zu lassen.

#### **ASH DEC-Verfahren**

Bei diesem Verfahren wird die angefeuchtete Klärschlammasche zunächst mit Magnesium- oder Calciumchlorid gemischt und zu Pellets verarbeitet. Die Pellets werden anschließend für 20 – 30 Minuten in einem Drehrohrofen bei ca.  $1.000\text{ °C}$  behandelt. Dabei gehen die Schwermetalle als Schwermetallchloride in die Gasphase über und werden in der Abgasreinigung abgeschieden. 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 Outotec GmbH & Co. KG weitergeführt. Geplant ist der Bau einer großtechnischen Anlage.

#### **Remondis TetraPhos®-Verfahren**

Die Klärschlammasche wird in Phosphorsäure gelöst, wobei die Phosphorsäure mit dem Phosphoranteil der Asche angereichert wird. Das angereicherte Produkt wird in verschiedenen Selektionsstufen aufbereitet. So lassen sich Phosphorsäuren für die Herstellung von Phosphaten (u. a. Düngemitteln), Gips für die Baustoffindustrie, aber auch Eisen- und Aluminiumsalze gewinnen. Dieses Verfahren wird von der Remondis GmbH vorangetrieben und auch genutzt (Remondis 2018). Nach einer Versuchsphase im Jahr 2015 wird seit 2018 an einer großtechnischen Umsetzung in Hamburg gearbeitet (UBA 2018).

#### **EuPhoRe**

Das EuPhoRe-Verfahren ist ein mehrstufiges thermo-chemisches Behandlungsverfahren für Klärschlämme und andere Biomassen in Drehrohr-Reaktoren. Die Schlammbehandlung beginnt mit der

Additivierung, welche mittels Alkali- und/oder Erdalkalichloriden oder -sulfaten erfolgt. Der erste thermische Behandlungsschritt ist die Trocknung der entwässerten Schlämme, gefolgt vom Übergang in die Reduktionsphase der Pyrolyse. Hier werden die Metalle als Chloride über die Gasphase ausgeschleust und die organische Phase in Biomassekoks und Pyrolysegas umgewandelt. In der anschließenden Oxidationszone wird der Kohlenstoff bei Temperaturen über 900 °C verbrannt und damit die Zerstörung sämtlicher organischer Schadstoffe garantiert. Gleichzeitig gewährleistet der unmittelbare Temperaturanstieg beim Übergang der Pyrolyse- zur Verbrennungsphase eine Umkristallisation der ursprünglichen Mineralsubstanz hin zu pflanzenverfügbaren Phosphaten. Referenzanlagen sind in Oftringen und in Urvier in der Schweiz zu finden.

### Ash2®Phos-Verfahren

Ash2Phos ist ein nasschemisches Verfahren. Im ersten Schritt werden die Aschen in Salzsäure gelöst und die ungelösten Reststoffe abgetrennt. Rückgewinnbare Elemente wie Phosphor, Eisen und Aluminium können in weiteren Prozessschritten zu Zwischenprodukten verarbeitet werden. Diese können je nach Bedarf zu unterschiedlichen, schadstoffarmen Endprodukten veredelt werden. Es gibt zwei Konzepte:

- Das City-Konzept ist für limitierte Aschemengen ab ca. 10.000 Mg/a ausgelegt und endet auf der Stufe des Zwischenprodukts
- Das Industriekonzept beinhaltet den kompletten Weg der Behandlung inklusive der Veredelung zu einem marktfähigen, schadstoffarmen Produkt an einem Standort.

Eine Pilotanlage steht in Helsingborg, Schweden.

### PARFORCE-Verfahren

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 Freiberg, Sachsen, ist eine Pilotanlage in Betrieb.

## 7.4 Perspektiven der Phosphorrückgewinnung aus Abwasser und Klärschlamm

Die meisten Verfahren zur Phosphorrückgewinnung befinden sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstadium. Einige wenige Verfahren, wie z.B. das OSTARA PEARL-Verfahren oder das AirPrex-Verfahren, sind weltweit bereits mehrfach großtechnisch umgesetzt. Dennoch fehlen bei den meisten Verfahren die Erfahrungen im großtechnischen Betrieb. Unklar ist derzeit die Marktnachfrage der gewonnenen Phosphorprodukte.

Es ist davon auszugehen, dass sich die Entwicklung der Phosphor-Recyclingverfahren durch die geopolitisch unsichere Lage der Versorgerländer und der steigenden Verunreinigung mit Schwermetallen von Rohphosphaten beschleunigen wird (DECHEMA E.V. VDI 2017). Auch die Vorgaben der Klärschlammverordnung, die eine P-Rückgewinnung grundsätzlich fordert, werden hier wirken. Dadurch ist eine zunehmende Wirtschaftlichkeit der Phosphorrückgewinnung zu erwarten. Die Rückgewinnung aus Klärschlammaschen zeigt hier das höchste Potential, da hohe Rückgewinnungsraten und eine hohe Produktqualität bei akzeptablen Produktionskosten möglich sind (BUNDESAMT FÜR UMWELT 2017). In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass Phosphorrecyclingprodukte häufig niedrigere Schadstoffgehalte (Cadmium, Uran) als Phosphordünger aus Primärlagerstätten aufweisen.

Die Phosphorrückgewinnung aus Schlammwässern auf Kläranlagen durch MAP-Fällung könnte mit relativ geringem technischem Aufwand umgesetzt werden. Hierbei können jedoch nur ca. 30 % des im Zulauf der Kläranlagen enthaltenen Phosphors zurückgewonnen werden (LAGA 2015). Ein Vorteil gegenüber anderen Verfahren kann sein, dass neben Phosphor auch der Nährstoff Stickstoff wieder verfügbar gemacht wird. Ein Nachteil kann sein, dass bedingt durch geringe Rückgewinnungsraten zusätzlicher Aufwand für eine weitere P-Rückgewinnung aus Klärschlamm oder Klärschlamm-Asche entstehen könnte.

Auf Grund der aktuellen Stickstoffübersorgung in weiten Teilen Deutschlands bieten sich Verfahren zur Behandlung von Klärschlamm-Aschen an. Die Rückgewinnungspotenziale liegen um 90 %, bezogen auf den im Abwasserzulauf enthaltenen Phosphor (LAGA 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 (DEUTSCHE PHOSPHOR PLATTFORM 2018).

Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm z.B. in Zementwerken oder Müllheizkraftwerken ist eine nachträgliche Rückgewinnung des Phosphors nicht mehr möglich oder aufgrund der geringen Phosphorgehalte in den Rückständen nicht wirtschaftlich. Hier wäre eine möglichst weitgehende Phosphorrückgewinnung vor der Mitverbrennung anzustreben. Dies wurde auch in der Klärschlammverordnung von 2017 berücksichtigt. Klärschlämme, die P-Gehalte  $\geq 20$  g P/kg TM enthalten, also ein entsprechendes Potential für die P-Rückgewinnung aufweisen, dürfen nur in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen verbrannt oder in Klärschlammmitverbrennungsanlagen, die ausschließlich mit Kohle oder Gas befeuert werden, mitverbrannt werden.

Eine Verwertung von Klärschlamm-Aschen als Düngemittel nach den Vorgaben der Düngemittelverordnung (DüMV) ist grundsätzlich möglich, solange die Aschen die Grenzwerte einhalten. Hier bietet sich die Monoverbrennung von Klärschlämmen an, da keine Verdünnung der Phosphorkonzentration erfolgt. Verfahren wie z.B. TetraPhos oder EuPhoRe erzeugen hochwertige Produkte. Nach Einschätzung einiger Experten wird zukünftig ein wirtschaftlicher Betrieb erwartet. Eine Klärschlammmonoverbrennung wird derzeit u. a. von der Emter GmbH in Altenstadt und der Kläranlage Steinhäule betrieben. Die Klärschlamm-Asche aus den beiden Monoverbrennungsanlagen wurde (zum Teil) bis Anfang 2018 an Düngemittelhersteller zur Weiterverarbeitung abgegeben. Dieser Weg ist aber mittelfristig unsicher. Bei der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm-Aschen ist die Verfügbarkeit des Phosphors zu berücksichtigen.



## 8 Vergleich der ökologischen Auswirkungen

### 8.1 Gesundheitsschutz

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.

Die verschiedenen thermischen Behandlungsverfahren (siehe Kapitel 6) sind hinsichtlich der Zerstörung der organischen Schadstoffe und Keime gleich positiv zu bewerten. Anlagen mit gezielter Quecksilberabscheidung, z. B. Müllheizkraftwerke und Monoverbrennungsanlagen, vermeiden zusätzlich diffuse Quecksilber-Immissionen.

Werden die Verbrennungaschen aus der thermischen Behandlung als Düngemittel in der Landwirtschaft eingesetzt, gelangen die im Klärschlamm enthaltenen Schwermetalle wieder in den Boden. Allerdings kann durch diese Verwertungsart die in den Aschen enthaltene wertvolle Ressource Phosphor wieder genutzt werden.

### 8.2 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.

Eine Verwertung von Klärschlammaschen als Düngemittel nach den Vorgaben der Düngemittelverordnung (DüMV) ist grundsätzlich möglich, aber nur für Aschen, die die Grenzwerte der DÜMV (2017) einhalten. Für die Rückgewinnung des Phosphors aus Rückständen der thermischen Monobehandlung gibt es bereits mehrere Verfahren, die jedoch großtechnisch noch nicht umgesetzt sind.

### 8.3 Fazit

Betrachtet man die o. g. Schutzgüter im Zusammenhang, so ist ein Entsorgungsweg umso ökologischer,

- je mehr Schadstoffe aus der Biosphäre endgültig entfernt werden und
- je mehr Phosphat zurückgewonnen und pflanzenverfügbar dem Boden wieder zugeführt wird.

Bei der Auswahl eines Entsorgungsweges muss zwischen diesen Ansprüchen abgewogen werden, da die verschiedenen Verfahren jeweils ihre spezifischen Vor- und Nachteile aufweisen.

## 9 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 den Erhebungen der bifa Umweltinstitut GmbH. 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.

### 9.1 Speicherung

Von den Kläranlagen, die Angaben zu dem Thema Speicherung machten, können etwa 33 % der Kläranlagen Klärschlamm intern zwischenlagern. 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 Entsorgungsengpässe zu überbrücken und um damit die Entsorgungssicherheit zu erhöhen.

### 9.2 Transporte

#### 9.2.1 Transporte zur Entwässerung

Nassschlamm (3 - 6 % TR-Gehalt) wird dann zu einer größeren Kläranlage transportiert, wenn eine Entwässerung (stationär oder mobil) vor Ort nicht möglich oder nicht wirtschaftlich ist.

Für den Transport des Nassschlammes (ca. 5 % TR-Gehalt) zur Entwässerung lassen sich bis zu einer **Entfernung von 10 km** Orientierungswerte von **4 bis 11 €/m<sup>3</sup> Nassschlamm** angeben. Je m<sup>3</sup> 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 €/m<sup>3</sup> Nassschlamm**, entsprechend 0,20 € je m<sup>3</sup> und km.

#### 9.2.2 Transporte zur Trocknung

Falls der entwässerte Klärschlamm (ca. 25 % TR-Gehalt) 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.

### 9.2.3 Transporte zur thermischen Behandlung

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**.

## 9.3 Entwässerung

Orientierungswerte für die Entwässerung des Klärschlammes können **im Mittel mit etwa 8 €/m<sup>3</sup> 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 **7 bis 10 €/m<sup>3</sup> Nassschlamm**.

## 9.4 Trocknung

### 9.4.1 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.

### 9.4.2 Thermische Trocknung

Thermische Trocknungsanlagen können erst ab einer Anlagengröße von etwa 5.000 t entwässerter Klärschlamm/a wirtschaftlich betrieben werden.

Hinsichtlich der spezifischen Investitions- und Betriebskosten wurden im Rahmen der Befragung der Marktteilnehmer keine aktuellen Kostenangaben angegeben. Lediglich eine Kläranlage nannte einen Entsorgungskomplettpreis in Höhe **von 58 €/t** entwässerter Klärschlamm, der auch die Kosten der thermischen Trocknung beinhaltet.

Kostenrecherchen aus dem Jahr 2010 (LFU 2011B) ergaben folgende Orientierungswerte:

- Investitionskosten zwischen 20 und 28 €/t entwässerter Klärschlamm
- Betriebskosten zwischen 26 bis 27 €/t entwässerter Klärschlamm

Daraus ergaben sich bei der thermischen Trocknung für die Jahresgesamtkosten Orientierungswerte von **46 bis 55 €/t** entwässerter Klärschlamm im Jahr 2010.

## 9.5 Thermische Behandlungsverfahren

### 9.5.1 Monoverbrennung

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

### 9.5.2 Mitverbrennung im Kohlekraftwerk

Als Orientierungswerte für eine Mitverbrennung im Kohlekraftwerk können Kosten von **58 bis 90 €/t entwässertes Klärschlamm** angegeben werden. **Im Mittel sind dies 75 €/t**. In Bayern steht zur Mitverbrennung von Klärschlamm lediglich das Kohlekraftwerk Zolling zur Verfügung. Dieses nimmt nur entwässerten Klärschlamm an.

### 9.5.3 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 von **80 bis 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 entwässertes Klärschlamm wird mit vorhandener Verbrennungsenergie am Müllheizkraftwerk getrocknet.

### 9.5.4 Zementwerk

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

### 9.5.5 Vergasungs- und Pyrolyseverfahren

Vergasungs- und Pyrolyseverfahren spielen im derzeitigen Entsorgungsmarkt keine Rolle. Solche Konversionsanlagen existieren lediglich im Entwicklungsmaßstab. Eine bestehende Pyrolyseanlage im großtechnischen Maßstab am Standort Burgau wurde stillgelegt. Entsorgungspreise konnten vor diesem Hintergrund nicht erhoben werden.

### 9.5.6 Landwirtschaftliche Klärschlammverwertung

Zur Verwertung in der Landwirtschaft kommen Nassschlämme und entwässerte Klärschlämme. Die Verwertungskosten liegen für Nassschlamm (3 - 5 % TR-Gehalt) im Bereich von **10 bis 29 €/m<sup>3</sup>**. Der Mittelwert liegt bei etwa **17 €/m<sup>3</sup>**. 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.

### 9.5.7 Landbauliche Klärschlammverwertung (Rekultivierung)

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

## 9.6 Gesamtbetrachtung der Kosten

Tab. 7 und Abb. 13 geben einen Überblick über die Entsorgungskosten für kommunale Klärschlämme nach unterschiedlichen Entsorgungsoptionen, auf Basis der Mittelwerte der einzelnen Verfahrensschritte. Bei allen regionalen und ortsspezifischen Unterschieden wird deutlich, dass die landwirtschaftliche Verwertung zu Düngezwecken gegenüber den anderen Entsorgungsvarianten (Landbau und Thermische Verfahren) kostengünstiger ist. Gleichzeitig besteht bei diesem Verfahren ein großes Potenzial, Schadstoffe in die Nährstoffkreisläufe einzubringen.

Bei der Entsorgung von entwässerten bzw. getrockneten Klärschlämmen sind die Entwässerungs- bzw. Trocknungskosten eingerechnet. Die Kosten für eine eventuelle externe Klärschlammspeicherung sind nicht enthalten, ebenso die Transportkosten. Es wird darauf hingewiesen, dass die Kosten der solaren Klärschlamm-trocknung nur auf zwei Angaben beruhen und daher nur bedingt repräsentativ sind. Die Kosten der thermischen Trocknung stammen aus (LFU 2011B) und sind daher nur wenig aktuell.

Tab. 7: Kostenübersicht je m<sup>3</sup> Klärschlamm bzw. je t Trockenmasse Klärschlamm nach Entsorgungsoptionen/ Orientierungswerte

Einheit		Nassschlamm	Entwässerter Schlamm						Getrockneter Schlamm			
Verwertungsschritt		Landwirtschaft	Landwirtschaft	Landbau	MVA	Monoverbrennung	Kohlekraftwerk	Zementwerk	Landbau	MVA	Monoverbrennung	Zementwerk
Entwässerung	€/m <sup>3</sup> (5% TR)		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
	€/t TM		160	160	160	160	160	160	160	160	160	160
Trocknung	€/t (25% TR)								129 <sup>1</sup> 50 <sup>2</sup>	129 <sup>1</sup> 50 <sup>2</sup>	129 <sup>1</sup> 50 <sup>2</sup>	129 <sup>1</sup> 50 <sup>2</sup>
	€/t TM								516 <sup>1</sup> 200 <sup>2</sup>	516 <sup>1</sup> 200 <sup>2</sup>	516 <sup>1</sup> 200 <sup>2</sup>	516 <sup>1</sup> 200 <sup>2</sup>
Verwertung Nassschlamm	€/m <sup>3</sup> (5% TR)	17										
	€/t TM	339										
Verwertung entw. Schlamm	€/t (25% TR)		60	83	80	118	75	79				
	€/t TM		238	333	319	474	299	314				
Verwertung getr. Schlamm	€/t (90% TR)								91	95	92	89
	€/t TM								101	106	103	99
Summe	€/t TM	339	398	493	479	634	459	474	777 <sup>1</sup>	782 <sup>1</sup>	779 <sup>1</sup>	775 <sup>1</sup>
										460 <sup>2</sup>	465 <sup>2</sup>	462 <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Mittelwert solare Trocknung

<sup>2</sup> Mittelwert thermische Trocknung (LFU 2011B)

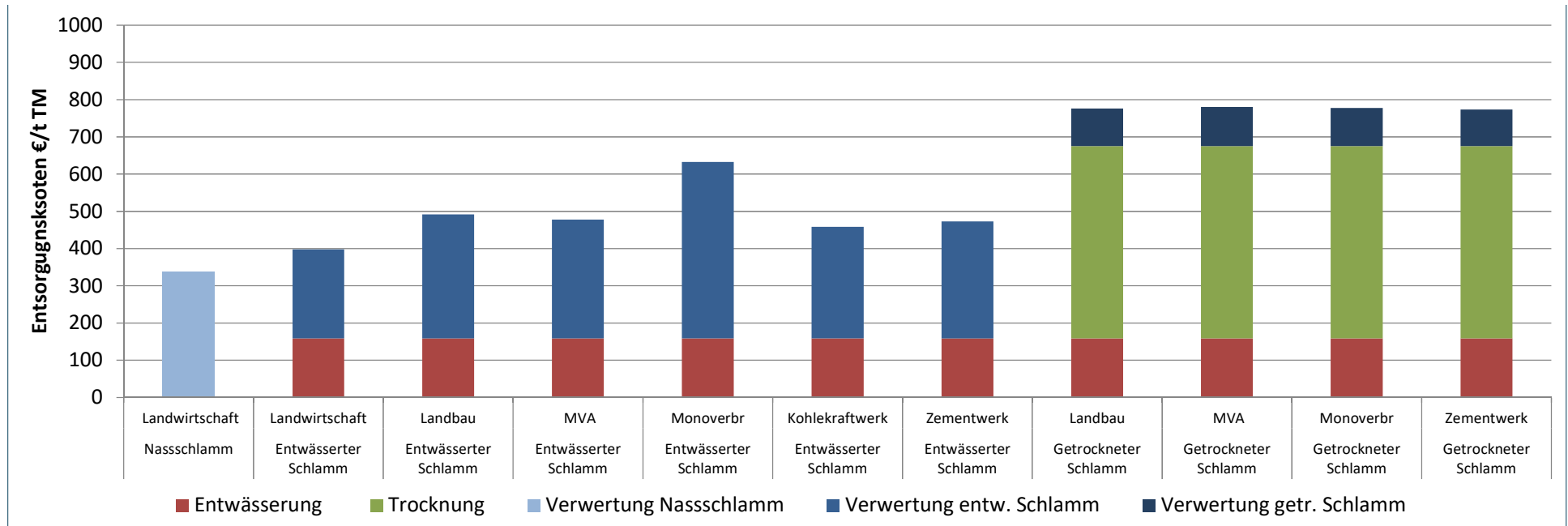


Abb. 13: Entsorgungskosten je t Trockenmasse Klärschlamm nach Entsorgungsoptionen (ohne externe Speicherung). Darstellung Trocknung auf Basis Mittelwert solare Trocknung)

## 10 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 Gebührenzählern 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.

### 10.1 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 (2018) i.V.m. Art. 34 Abs. 1 BAYWG (2010) wahrgenommen. Im Bereich der Abwasserbeseitigung kooperieren die Gemeinden bereits in unterschiedlicher Intensität und Form. Beispielsweise gibt es in Bayern ca. 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 (2017), denn bei einem im Sinne des § 54 Abs.



2 Satz 1 WHG (2018) entwässerten Klärschlamm handelt es sich um Abfall im Sinne von § 2 Abs. 2 ABFKLÄRV (2017) <sup>5</sup>.

Nach der Regelung in § 3 Abs. 1 ABFKLÄRV (2017), einer Bundesverordnung, hat der Klärschlamm-erzeuger, also die Gemeinde, „den in ihrer Abwasserbehandlungsanlage anfallenden Klärschlamm möglichst hochwertig zu verwerten, soweit dies technisch möglich und wirtschaftlich zumutbar ist“.

Der Klärschlamm-erzeuger, 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 Gemeindeordnung 2019 – GO 2019). 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 (2019) nicht zur Anwendung.

## 10.2 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-entsorgungs-Zweckverbandes oder eines gemeinsamen Kommunalunternehmens geeignet:

- 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
- Errichtung, Betrieb und Unterhaltung einer 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 (2017) sogar sein:

- möglichst hochwertige Verwertung des anfallenden Klärschlammes,

<sup>5</sup> Zur Abgrenzung Abwasserbeseitigung und Abfallentsorgung (unterschieden nach Abfall zur Verwertung und Abfall zur Beseitigung) siehe ausführlich (THIMET), dort Teil IX Frage 10.

- Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm,
- Rückführung des gewonnenen Phosphors oder der phosphorhaltigen Klärschlammverbrennungsasche in den Wirtschaftskreislauf.

Insbesondere in Bezug auf letztgenannte Aspekte sind dabei die haushaltsrechtlichen Gebote der Sparsamkeit und Wirtschaftlichkeit zu beachten (vgl. Art. 61 Abs. 2 GO 2019). Gegebenenfalls können auch geeignete private Dritte, zum Beispiel im Rahmen öffentlich-privater Partnerschaften (ÖPP), in die Aufgabenerfüllung einbezogen werden (vgl. dazu unten 10.5.4).

### 10.3 Vermischungsverbot

Das Vermischungsverbot nach § 15 Abs. 3 ABFKLÄRV (2017), 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 (2017) und seinem Sinn und Zweck ausschließlich auf die Abgabe von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost mit dem Zweck der nachfolgenden Verwertung auf und in Böden.

### 10.4 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 2016B, „Zweckverband Abfallwirtschaft“; OLG CELLE 2017). Im Übrigen kommen die in § 108 GWB (2018) aufgeführten Ausnahmetatbestände (sogenannte In-house- 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 (2012) erfüllt sind. Zum Beispiel ist nach (EuGH 2016A, „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 2019). Eine frühzeitige Einbindung der Aufsichtsbehörde in das Projekt ist daher sehr zu empfehlen.

## 10.5 Organisationsformen

Interkommunale Zusammenarbeit zur Klärschlammentsorgung 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 2019; Art. 89 Abs. 1 Satz 2 GO 2019) an der interkommunalen Zusammenarbeit beteiligen.

### 10.5.1 Zweckvereinbarung, öffentlich-rechtlicher Vertrag

Nach Art. 7 Abs. 2 KOMMZG (2019) 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 (2019) 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 2019) und (gemeinsame) Kommunalunternehmen (vgl. Art. 1 Abs. 2 Satz 2 KOMMZG 2019) 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 2019; vgl. zum weiteren Mindestinhalt einer solchen Zweckvereinbarung zudem die Art. 10 und Art. 14 KOMMZG 2019). Die Zweckvereinbarung bedarf mindestens der Anzeige bei der Aufsichtsbehörde. Werden Befugnisse übertragen, ist sie genehmigungspflichtig (vgl. Art. 12 KOMMZG 2019).

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 2018) und des Umsatzsteuerrechts (vgl. den spätestens ab 1.1.2021 greifenden § 2b UStG 2018) zu berücksichtigen.

### 10.5.2 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 2019). 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 2019). Letzteres ist wegen der Beschränkung der Stimmrechte Privater nach Art. 31 Abs. 1 Satz 4 KOMMZG (2019) 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 2019) <sup>6</sup>.

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 2019). Der Zweckverband ist mit eigenen Organen ausgestattet, nämlich dem Verbandsvorsitzenden und der Verbandsversammlung (Art. 29 ff. KOMMZG 2019). 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 2019). Jedes Verbandsmitglied entsendet mindestens einen Vertreter in die Verbandsversammlung. Mehrfachvertretungen bzw. Mehrfachstimmrechte zugunsten einzelner Verbandsmitglieder können in der Verbandsatzung vorgesehen werden, wobei die Vertretung im angemessenen Verhältnis zum Anteil des jeweiligen Verbandsmitglieds an der Erfüllung der Aufgabe stehen soll (vgl. Art. 31 KOMMZG 2019). Die Verbandsräte unterliegen einem allgemeinen Weisungsrecht der entsendenden Gemeinde (vgl. Art. 33 Abs. 2 Satz 4 und 5 KOMMZG 2019). 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 Verbandsatzung festzulegen (Art. 42 KOMMZG 2019).

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 2019). 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. 10.5.3) ist der Zweckverband enger an die Verbandsmitglieder angebunden, was die Entscheidungswege unter Umständen verlängert. Eine Beteiligung Privater ist nur eingeschränkt möglich.

---

<sup>6</sup> Aktuelle Muster einer Verbandsatzung eines Zweckverbands zur Wasserversorgung und eines Zweckverbands zur Abwasserbeseitigung mit umfassenden Erläuterungen finden sich z.B. bei (THIMET & GAß), dort Teil VI – 2.21 und 2.22.

### 10.5.3 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.<sup>7</sup>

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 (2019) in Verbindung mit den Regelungen zum gemeindlichen Kommunalunternehmen in den Art. 89 bis 91 GO (2019). 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 sein<sup>8</sup>. 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 2019). 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 (2019) 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 2019). Im Übrigen enthält Art. 50 Abs. 2 KOMMZG (2019) 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!<sup>9</sup>

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 2019; § 14 Abs. 2 KUV 2019); 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 2019) nach den Regeln der kaufmännischen doppelten Buchführung. Jahresabschluss und Lagebericht unterliegen der Jahresabschlussprüfung nach HGB (2018) (vgl. Art. 91 Abs. 1 GO; § 27 KUV 2019).

<sup>7</sup> Ausführlich dazu (GAß A. 2017).

<sup>8</sup> (SCHULZ et al 2019), dort Band II, Erl. 3.1 zu Art. 49 KOMMZG (2019).

<sup>9</sup> Vgl. dazu (GAß & POPP 2018), dort Kap. 9 und die Beispiele für Unternehmenssatzungen in Kap. 16, 5. und 6.

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.

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.

#### 10.5.4 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 2019). Verbreitet sind dabei in Bayern vor allem die Gesellschaftsformen der GmbH und der GmbH & Co.KG<sup>10</sup>. Gesellschafter dieser Rechtsformen können sowohl Gebietskörperschaften als auch sonstige öffentlich-rechtliche Körperschaften und Anstalten (vgl. für den Zweckverband Art. 40 Abs. 1 KOMMZG 2019; für das KU Art. 89 Abs. 1 Satz 2 GO 2019) 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.<sup>11</sup>

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.

##### 10.5.4.1 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 2017). Das geringste mögliche Stammkapital der GmbH beträgt – mit Ausnahme der Unternehmergesellschaft nach § 5a GMBHG 2017 – 25.000 €. Die Haftung gegenüber den Gläubigern ist auf das Gesellschaftsvermögen beschränkt (vgl. §§ 1, 13 GMBHG 2017). Dies ist wichtig wegen der kommunalrechtlichen Vorgabe der Haftungsbeschränkung aus Art. 92 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 GO (2019).

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 2017). 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 2017). Zu beachten ist, dass erste Bürgermeister oder ehrenamtliche Gemeinderatsmitglieder nicht gleichzeitig Geschäftsführer einer Gesellschaft sein können, an der die

---

<sup>10</sup> Zu weiteren denkbare Privatrechtsformen wie etwa der Aktiengesellschaft (AG) oder der Genossenschaft vgl. (GAß & POPP 2018), (Fn. 4), Kap. 11 bis 14.

<sup>11</sup> Weitere Informationen zum Thema ÖPP unter [www.stmb.bayern.de/buw/bauthemen/ppp](http://www.stmb.bayern.de/buw/bauthemen/ppp).

Gemeinde mit mehr als 50 Prozent beteiligt ist (vgl. Art. 34 Abs. 5 Nr. 1, Art. 31 Abs. 3 Satz 1 Nr. 3 GO 2019).

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 2019). Sie ist kraft Gesetzes zur Entscheidung grundlegender Fragen berufen (vgl. § 46 GMBHG 2017), z.B. zur Feststellung des Jahresabschlusses, zur Entlastung der Geschäftsführung und zur Entscheidung über die Ergebnisverwendung; weitere Zuständigkeiten können im Gesellschaftsvertrag geregelt werden. Darüber hinaus haben die einzelnen Gesellschafter umfassende Auskunfts- und Einsichtsrechte gegenüber der Geschäftsführung (§ 51a GMBHG 2017).

Daneben kann der Gesellschaftsvertrag die Einrichtung eines Aufsichtsrats vorsehen, in den die Beteiligten Vertreter entsenden (vgl. Art. 93 Abs. 2 GO 2019)<sup>12</sup>. 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.<sup>13</sup>

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 2019). 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. Ein Nachteil können die höheren Gründungs- und Betriebskosten sein. Mögliche steuerrechtliche Vorteile sind im Einzelfall zu prüfen.

#### 10.5.4.2 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,

<sup>12</sup> 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.

<sup>13</sup> Ausführlich zu den Rechten und Pflichten des Aufsichtsrats (GAß & POPP 2018), (Fn. 4) Kap. 11 Erl. 2.3.

dafür aber auch zur Geschäftsführung und Vertretung der Gesellschaft befugt ist (vgl. §§ 161 Abs. 1, 164, 170, 171 HGB 2018). Um die Vorgabe einer Haftungsbeschränkung für die gemeindefirtschaftliche Betätigung in Art. 92 Abs. 1 Satz 1 Nr. 3 GO (2019) 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 2019), wird im 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 2018). 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 2018).

Für die Rechnungslegung der GmbH & Co.KG gelten nach § 264a HGB (2018) 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.

## 10.6 Möglichkeiten der Förderung

Es wird vorab darauf hingewiesen, dass eine Doppelförderung grundsätzlich nicht möglich ist. Es wird empfohlen, frühzeitig vergleichende Betrachtungen anzustellen, welche Förderung für das Projekt am günstigsten ist.

### 10.6.1 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“, (ALLMBL 2018) möglich. Gefördert werden neue und vorbildhafte Projekte in interkommunaler Zusammenarbeit, soweit die im KOMMZG (2019) vorgesehenen oder sonstigen öffentlich-rechtlichen Rechtsformen gewählt werden. Antragsberechtigt sind alle bayerischen kommunalen Gebietskörperschaften und deren Zusammen-



schlüsse 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 Euro gewährt, jedoch maximal 85 % der zuwendungsfähigen Ausgaben, die unter Beachtung des Wirtschaftlichkeitsprinzips anfallen. Eine erhöhte Zuwendung mit bis zu 90.000 Euro 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 [www.stmi.bayern.de/kub/komzusammenarbeit](http://www.stmi.bayern.de/kub/komzusammenarbeit) abgerufen werden.

### 10.6.2 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 Klimaschutzziele geschaffen. Dieses Programm läuft vom 1.1.2019 bis zum 31.12.2022. Gefördert werden in diesem Förderprogramm Kommunen, kommunale Zusammenschlüsse, öffentlich-rechtlich organisierte Wasserwirtschaftsverbände, sowie Betriebe, Unternehmen und sonstige Organisationen mit mindestens 25 % kommunaler Beteiligung. Das BMU stellt unter der Seite [www.klimaschutz.de/kommunalrichtlinie](http://www.klimaschutz.de/kommunalrichtlinie) einen Förderlotsen und alle Antragsformulare zur Verfügung.

Insbesondere gibt die Kommunalrichtlinie des Bundesumweltministeriums Anreize, eine klimafreundliche Abwasserbehandlung in Kläranlagen zu erreichen.

## Anhang: Erhebungsbogen

### Erfassung der Kläranlagen- und Klärschlammdaten

<b>Kläranlage</b> _____	
Betreiber _____	
Ausbaugröße (EW) _____	mittlere Belastung (EW) _____
Abstand der Kläranlage zur nächsten Bebauung (m) _____	
Phosphorelimination	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> falls ja: chemisch <input type="checkbox"/> biologisch <input type="checkbox"/>
Schlammstabilisierung	aerob <input type="checkbox"/> anaerob <input type="checkbox"/>
Klärschlammmenge (m <sup>3</sup> /a) _____	Trockenrückstandsgehalt (% TR-Gehalt) _____
<b>Schlammbehandlungseinrichtungen</b>	
<b>Faulturm</b> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	<b>Schlammstapelbecken (SSB)</b> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
Füllmenge gesamt (m <sup>3</sup> ) _____	Füllmenge gesamt (m <sup>3</sup> ) _____
davon in Gebrauch (m <sup>3</sup> ) _____	davon in Gebrauch (m <sup>3</sup> ) _____
	Unterteilung des SSB (Anzahl der Kammern) _____
<b>Entwässerungsaggregat</b> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	<b>Schlammwasserspeicherung</b> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
Art _____	Füllmenge gesamt (m <sup>3</sup> ) _____
Fabrikat _____	davon in Gebrauch (m <sup>3</sup> ) _____
Leistung (m <sup>3</sup> /h) _____	
Momentane Laufzeit (ca. h/a) _____	
<b>Mobile Entwässerung</b> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>	<b>Aufstellflächen für weitere</b>
Unternehmer _____	<b>Behandlungsaggregate vorhanden</b> ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
Entwässerungsaggregat _____	Entwässerungsaggregat (m <sup>2</sup> ) _____
Entwässerungsgrad (% TR) _____	Trocknungsanlage (m <sup>2</sup> ) _____
<b>Annahme von Fremdschlämmen</b>	
ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> geplant <input type="checkbox"/>	
Behandlungsmöglichkeiten (z. B. Faulung, Entwässerung, Trocknung) _____	
<b>Klärschlammentsorgung</b>	
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) _____	
<b>vorhandene Wärme- / Energiequellen für eine Klärschlamm-trocknung / Brüdenentsorgung</b>	
Blockheizkraftwerk	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ; falls ja: Leistung (kW <sub>el</sub> ) _____ (kW <sub>therm</sub> ) _____
Faulgas	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> ; falls ja: Menge (m <sup>3</sup> /a) _____
Interesse an eigener Trocknungsanlage	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
Bekannte Wärmequelle im Umfeld	_____ kW <sub>therm</sub> _____
Brüdenentsorgung im Umfeld	ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/> Abgasreinigung ja <input type="checkbox"/> nein <input type="checkbox"/>
<b>vorhandener Stromanschluss</b>	
max. Leistung (kW <sub>el</sub> ) _____	

## Literaturverzeichnis

- ABFKLÄRV (2017): Klärschlammverordnung, BGBl I S. 3465.
- ABFPV (2006): Verordnung über den Abfallwirtschaftsplan Bayern, GVBl 2006 S. 1028.
- ABFPV (2014): Verordnung über den Abfallwirtschaftsplan Bayern, GVBl. 2014 S. 578.
- AEUV (2012): Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union vom 09.05.2008, ABl. EG Nr. C115, S. 47, in der Fassung der Änderung vom 24.04.2012, ABl. EG Nr. L112/21.
- AllMBI (2018): Richtlinie für Zuwendungen des Freistaates Bayern zur Förderung der interkommunalen Zusammenarbeit, Allgemeines Ministerialblatt vom 21.12.2018, Nr. 18. S.1231.
- ATZ ENTWICKLUNGSZENTRUM [Hrsg.] (2009): Quellen, Mengen und Pflanzenverfügbarkeit von Phosphorverbindungen in biogenen Abfällen und Reststoffen – Ermittlung von Substitutionspotenzialen für mineralische P-Dünger. Literaturstudie im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Gesundheit, München.
- BUNDESAMT FÜR UMWELT [Hrsg.] (Schweiz) (2017): Beurteilung von Technologien zur Phosphor-Rückgewinnung. 2017.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT [Hrsg.] (2011a): Analyse und Verteilungsverhalten von perfluorierten Tensiden und anderen persistenten organischen Spurenstoffen in Klärschlamm und Boden, Teil 2: Verteilungsverhalten von PFC, Augsburg 2011.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT [Hrsg.] (2011b): Klärschlamm Entsorgung in Bayern Planungshilfe für Kommunen. Bearbeiter: Müller, R., Reitberger, F., Leitschuh, St., Beck, R., Mix-Spagl, K., Augsburg 2011.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT [Hrsg.] (2017): Klärschlamm: Aktueller Stand in Deutschland/ Bayern, 2017.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT [Hrsg.] (2018): Überprüfung der Anlagendaten aus dem EDV-System DABay.
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT/LANDESANSTALT FÜR UMWELT, MESSUNGEN UND NATURSCHUTZ BADEN-WÜRTTEMBERG [Hrsg.] (2010): Elektrokinetische Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche – EPHOS, Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben, Augsburg.
- BAYERISCHES KLÄRSCHLAMMNETZ (2017): Datenauswertung der Jahre 2015 bis 2017.
- BAYERISCHER MINISTERRAT (2001): Strategie für eine zukunftsfähige Klärschlamm Entsorgung in Bayern, Ministerratsbeschluss vom 15.05.2001, Bayerisches StMUG, Nr. MR - 07-05/2001, S. 3.
- BAYWG (2010): Bayerisches Wassergesetz, GVBl. S. 66.
- DWA [Hrsg.] (2004): Klärschlamm Trocknung, Merkblatt ATV-DVWK-M 379.
- DWA [Hrsg.] (2013): Maschinelle Schlamm Entwässerung, Merkblatt M 366.
- DECHEMA E.V. VDI [Hrsg.] (2017): Phosphatrückgewinnung, Statuspapier, Frankfurt am Main: ProcessNet-Fachgruppe „Rohstoffe“.

- DEUTSCHE PHOSPHOR PLATTFORM [Hrsg.] (2018): gesamtes Internetangebot. Abgerufen am 06.11.2018 von [www.deutsche-phosphor-plattform.de/information/dokumente](http://www.deutsche-phosphor-plattform.de/information/dokumente).
- DÜMV (2017): Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung - DüMV), BGBl. I 2012, Nr. 58 S. 2482, zuletzt geändert mit Art. 3 der Verordnung zur Neuordnung der guten fachlichen Praxis beim Düngen vom 26.5.2017, BGBl. I Nr. 32 S. 1305.
- EISENMANN GMBH & Co. KG [Hrsg.] (2011): Thermische Anlagen zur energetischen und stofflichen Verwertung, Publikation zur Abfallentsorgung, im damaligen Internetangebot aufgerufen am 31.01.2011.
- EuGH (2016A): Urteil vom 18.02.2016, Rs. C-446/14, abrufbar z.B. über dejure.org: <https://dejure.org/dienste/vernetzung/rechtsprechung?Gericht=EuGH&Datum=18.02.2016&Aktenzeichen=C-446/14>.
- EuGH (2016B): Urteil vom 21.12.2016, Rs. C-51/15, abrufbar z.B. über dejure.org: <https://dejure.org/dienste/vernetzung/rechtsprechung?Gericht=EuGH&Datum=21.12.2016&Aktenzeichen=C-51/15>
- GAß, A. (2017), Interkommunale Zusammenarbeit in Zweckverbänden und gKUs, BayGT 1/2017, S. 8, abrufbar unter [der Zeitschrift des Bayerischen Gemeindetags](#).
- GAß, A. & POPP, J. (2018): Die Gemeinde als Unternehmer, Band 7 der Praxisreihe des Bayerischen Gemeindetags, 2. Aufl. 2018, 342. S.
- GIRL (2009): Geruchsemissions-Richtlinie der Länderarbeitsgemeinschaft Immissionsschutz: Feststellung und Beurteilung von Geruchsimmissionen. Veröffentlicht z. B.: MBI NRW Nr. 31 S. 533.
- GMBHG (2017): Gesetz betreffend die Gesellschaften mit beschränkter Haftung (GmbHG), in der Fassung der letzten Änderung vom 17.07.2017, BGBl. I 2017, S. 2446.
- GO (2019): Gemeindeordnung für den Freistaat Bayern, GVBl 1998, S. 796, zuletzt geändert GVBl 2019, S. 98.
- GWB (2018): Gesetz gegen Wettbewerbsbeschränkungen, BGBl. I 2013, S. 1750, zuletzt geändert BGBl. I (2018), S. 1151.
- HGB (2018): Handelsgesetzbuch, BGBl Teil III (2010), FNA 4100-1, zuletzt geändert BGBl I 2018, S.1102.
- HOLM, O., THOMÉ-KOZMIENSKY, E., QUICKER, P. & KOPP-ASSENMACHER, S. (2018): Verwertung von Klärschlamm. vivis-Verlag, Neuruppin 2018, 573 S.
- KLÄRWERK GÖPPINGEN [Hrsg.] (2014): Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm, Machbarkeitsstudie, Göppingen 2014.
- KOMMZG (2019): Gesetz über die kommunale Zusammenarbeit, GVBl 1994, S. 555, zuletzt geändert durch die Verordnung zur Anpassung des Landesrechts an die geltende Geschäftsverteilung, GVBl. 2019, S. 98.
- KSVN GMBH [Hrsg.] (2018): KRN-Mephrec, Nürnberg 2018.

- KUV (2019): Verordnung über Kommunalunternehmen (KUV), vom 19.03.1998, GVBl. S 220, zuletzt geändert am 26.03.2019, GVBl. S. 98.
- LAGA (2015): Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung, Veröffentlichung der Ad-hoc-Arbeitsgemeinschaft (Ad-hoc-AG) der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Juli 2015.
- LAGA (2018): Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung, Veröffentlichung der Ad-hoc-Arbeitsgemeinschaft (Ad-hoc-AG) der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA), Mai 2018.
- LEP (2006): Landesentwicklungsprogramm Bayern 2006, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie, München.
- LFU: siehe unter Bayerisches Landesamt für Umwelt
- LUBW: siehe unter Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg
- MEYER, S., WILDERER, P.A. (2003): Schlammwasserbewirtschaftung und separate Schlammwasserbehandlung als interne Stickstoffsene kommunaler Kläranlagen, Technische Universität München.
- OLG CELLE (2017): Beschluss vom 03.08.2017, 13 Verg 3/13, abrufbar z.B. über dejure.org: <https://dejure.org/dienste/vernetzung/rechtsprechung?Gericht=OLG%20Celle&Datum=03.08.2017&Aktenzeichen=13%20Verg%203%2F13>.
- QUICKER, P. (2008): Thermische Klärschlammverwertung im Überblick, in: Müllmagazin 4/2008, S. 44.
- REMONDIS (2018): Die kommunale Kläranlage als Rohstoffrückgewinnungsanlage – dank TetraPhos®-Verfahren, Remondis Aqua GmbH & Co. KG, ohne Datum, abgerufen am 20.11.2018 von [www.remondis-aqua.de/aq/aktuelles/neue-verfahren](http://www.remondis-aqua.de/aq/aktuelles/neue-verfahren)
- SCHREFF, D. (2005): Technologien und aktuelle Konzepte: Klärschlamm-trocknung. In: Wasserwirtschaft Wassertechnik, 10/2005 und 11-12/2005.
- SCHULZ, N., WACHSMUTH, H.-J., ZWICK, W., BAUER, T., MÜHLBAUER, P., OEHLER, G., STANGLMAYR, H., WINKLER, C., BLOECK, O., STADLÖDER, A. & HAUTH, R. (2019): Kommunalverfassungsrecht Bayern, Gemeinde- und Schulverlag, 2019, Loseblattsammlung, 2234 S.
- STATISTA GMBH [Hrsg.] (2018): Abgerufen am 13.11.2018, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/432915/umfrage/durchschnittlicher-preis-fuer-phosphat-weltweit/>
- STEINMETZ, H. (2016): Phosphor-Rückgewinnung – Aktuelle Entwicklungen in Deutschland, 2. Kongress: Phosphor - Ein kritischer Rohstoff mit Zukunft -, Oktober 2016, Kaiserslautern.
- TA LUFT [Hrsg.] (2002): Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft: Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz, GMBI. 2002, Nr. 25 – 29, S. 511.
- THIMET, J. in WUTTIG, H. & THIMET, J. [Hrsg]: Gemeindliches Satzungsrecht und Unternehmensrecht, Rehm Verlag, Loseblattsammlung, 2650 S.
- THIMET, J. & GAS, A. in THIMET, J. [Hrsg]: Kommunalabgaben- und Ortsrecht in Bayern, Rehm Verlag, Loseblattsammlung, 5265 S.
- THOMÉ-KOZMIENSKY, K. J. (1998): Klärschlamm-trennung, Neuruppin, 1998.

UMWELTBUNDESAMT [Hrsg.] (2018): Klärschlamm Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland, Mai 2018, 104 S.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY [Hrsg.] (2018): Mineral Commodity Summaries, Januar 2018.

USTG (2018): Umsatzsteuergesetz, BGBl. I 2005, S. 386, zuletzt geändert BGBl. I 2018, S. 2338).

WORLD BANK [Hrsg.] (2018): Commodities Price Data (The Pink Sheet): Abgerufen am 26.11.2018 von <http://pubdocs.worldbank.org/en/406371515004954502/CMO-Pink-Sheet-January-2018.pdf>.

WHG (2018): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz) vom BGBl. I 2009, S. 2585, zuletzt geändert BGBl. I 2018, S. 2254.

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Entwicklung der Klärschlamm Entsorgung 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 Klärschlamm Entsorgungskonzeptes	15
Abb. 6:	Übersicht über in Bayern betriebene Trocknersysteme (Stand 2015)	19
Abb. 7:	Trocknerband mit Klärschlamm-Presslingen	22
Abb. 8:	Solarunterstützte Klärschlamm Trocknung	22
Abb. 9:	Klärschlammmonoverbrennungsanlage der Fa. Emter	29
Abb. 10:	Verfahrensschema der Klärschlammverbrennungsanlage der Fa. Emter	30
Abb. 11:	Verfahrensschema Klärschlammvergasungsanlage der Fa. SÜLZLE Kopf SynGas Klärschlammverwertung	31
Abb. 12:	Funktionsprinzip des Pyrobustors® der Fa. Eisenmann Anlagenbau GmbH & Co. KG	32
Abb. 13:	Entsorgungskosten je t Trockenmasse Klärschlamm nach Entsorgungsoptionen (ohne externe Speicherung). Darstellung Trocknung auf Basis Mittelwert solare Trocknung)	45

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Anzahl und Ausbaugrößen der bayerischen kommunalen Kläranlagen (Stand: 2016 (LFU 2018))	8
Tab. 2:	Beschreibung verschiedener Trocknersysteme mit Vor- und Nachteilen (nach (DWA 2004) mit Ergänzungen)	21
Tab. 3:	Beispielhafte Berechnung der notwendigen Wärmeleistung bei Konvektions- und Kontaktrocknern	26
Tab. 4:	Beispielhafte Berechnung der notwendigen Wärmeleistung bei solarunterstützten Trocknern	26
Tab. 5:	Bayerische Zementwerke mit Klärschlammverbrennung	28
Tab. 6:	Technische Konzeptionen von Monoverbrennungsanlagen in Bayern	28
Tab. 7:	Kostenübersicht je m <sup>3</sup> Klärschlamm bzw. je t Trockenmasse Klärschlamm nach Entsorgungsoptionen/ Orientierungswerte	44



