



KLÄRSCHLAMM- ENTSORGUNG

in der Bundesrepublik
Deutschland





Für Mensch & Umwelt

Umwelt 
Bundesamt

Impressum

Herausgeber:

Umweltbundesamt
Fachgebiete III 2.4 – Abfalltechnik, Abfalltechniktransfer
und III 2.5 – Überwachungsverfahren, Abwasserentsorgung
Postfach 14 06
06813 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 /umweltbundesamt.de
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt
 /umweltbundesamt

Autoren:

Andrea Roskosch, Patric Heidecke

Mitwirkende:

Claus-Gerhard Bannick, Simone Brandt, Maja Bernicke,
Claudia Dienemann, Marcus Gast, Maximilian Hofmeier,
Christian Kabbe, Kathrin Schwirn, Ines Vogel, Doris Völker,
Benjamin Wiechmann

Satz und Layout:

Atelier Hauer + Dörfler GmbH, Berlin

Publikationen als pdf:

www.umweltbundesamt.de/publikationen

Bildquellen:

Titel: shutterstock.com
stock.adobe.com: Markus Bormann, cpt212, Gordon Grand,
stu12; shutterstock.com

Stand: Oktober 2018

vollständig überarbeitete Auflage

ISSN (Print) 2363-8311

ISSN (Online) 2363-832X



KLÄRSCHLAMM- ENTSORGUNG

in der Bundesrepublik
Deutschland

Inhalt

Einführung	4
1 Grundlagen	6
Was ist Klärschlamm?.....	6
Wo fällt Klärschlamm an?.....	7
Relevante Rechtsvorschriften für die Klärschlamm Entsorgung.....	9
Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).....	9
Klärschlammverordnung (AbfKlärV) – Novelle 2017.....	9
EU-Klärschlammrichtlinie.....	13
HELCOM Recommendation.....	13
Düngerecht.....	14
Düngegesetz (DüngG).....	14
Düngeverordnung (DüV).....	14
Düngemittelverordnung (DüMV).....	16
EU Düngerecht.....	16
17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV).....	16
Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft).....	17
Deponieverordnung (DepV).....	17
2 Zusammensetzung von Klärschlamm	18
Schwermetalle im Klärschlamm.....	20
Organische Verbindungen im Klärschlamm.....	21
Krankheitserreger und Hygieneanforderungen.....	23
Arzneimittelrückstände im Klärschlamm.....	24
Nanomaterialien im Klärschlamm.....	26
Kunststoffe im Klärschlamm.....	27
3 Schlammbehandlung	28
Eindickung.....	28
Hygienisierung.....	28
Klärschlamm desintegration.....	30
Biologische Schlammstabilisierung.....	30
Entwässerung.....	30
Klärschlamm trocknung.....	31

4	Thermische Klärschlammbehandlung	36
	Klärschlammmonoverbrennung.....	36
	Feuerungssysteme	37
	Emissionen aus Klärschlammverbrennungsanlagen	38
	Sonstige Verfahren.....	38
	Entwicklungen alternativer Klärschlammbehandlungsverfahren	38
	Mitverbrennung von Klärschlamm	39
	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken	39
	Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen	40
	Mitverbrennung in Zementwerken	40
	Vor- und Nachteile der Mitverbrennung von Klärschlamm.....	41
5	Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm	42
	Nährstoffe im Klärschlamm	43
	Schadstoffe im Klärschlamm	44
	Vor- und Nachteile der bodenbezogenen Klärschlammverwertung... 45	
6	Phosphorrückgewinnung	46
	Phosphorrückgewinnungspotentiale und -verfahren	48
	Deutschland auf dem Weg zum wirtschaftlichen Phosphorrecycling... 51	
	Verwertungswege der Klärschlammverbrennungsaschen	55
7	Klärschlammfall, Entsorgung und Verwertung	56
	Entwicklung der Klärschlammmenge	59
	Kapazitäten zur thermischen Behandlung von Klärschlamm	60
	Klärschlammverwertung in den Mitgliedstaaten der EU.....	60
8	Kosten der Klärschlamm Entsorgung	64
9	Zusammenfassung und Empfehlungen	68
	Verzeichnisse und Anhänge	72
	Abbildungsverzeichnis	73
	Tabellenverzeichnis	73
	Abkürzungsverzeichnis	74
	Danksagung.....	75
	Literaturverzeichnis.....	76
	Anhang I.....	80
	Anhang II.....	89
	Anhang III	92

Einführung

Im Koalitionsvertrag zur 18. Legislaturperiode haben sich die Koalitionspartner darauf verständigt, die Klärschlammausbringung zu Düngezwecken zu beenden und Phosphor sowie andere Nährstoffe aus dem Klärschlamm zurückzugewinnen. Unter anderem wurde hierzu die Klärschlammverordnung novelliert; die Novelle trat am 03.10.2017 als „Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“ in Kraft.

Zentrales Element der neuen Klärschlammverordnung sind die Pflichten zur Rückgewinnung von Phosphor (P) aus Klärschlamm bzw. Klärschlammverbrennungsaschen. So müssen nach Ablauf einer Übergangsphase bei Klärschlämmen mit einem Mindestphosphorgehalt von 20 g/kg Trockenmasse (TM) solche Phosphorrückgewinnungsverfahren angewandt werden, die mindestens 50 % des in der Trockenmasse enthaltenen Phosphors aus dem Klärschlamm selbst zurückgewinnen oder den Phosphorgehalt auf weniger als 20 g/kg TM absenken

bzw. mindestens 80 % des in den Klärschlammverbrennungsaschen enthaltenen Phosphors zurückgewinnen lassen. Die Frist orientiert sich dabei an den entsprechend genehmigten Ausbaugrößen der Kläranlagen und läuft für Anlagen mit über 100.000 Einwohnerwerten (EW) zum 1. Januar 2029 bzw. für Anlagen über 50.000 EW zum 1. Januar 2032 ab. Bis dahin dürfen die Klärschlämme aus diesen Kläranlagen weiterhin bodenbezogen unter Einhaltung der Kriterien des Abfall- und Düngerechts verwertet werden. Klärschlämme aus kleineren Kläranlagen (≤ 50.000 EW) dürfen unbefristet auch künftig bodenbezogen verwertet werden.

Von den im Jahr 2016 in Deutschland angefallenen fast 1,8 Millionen Tonnen Klärschlamm Trockensubstanz (TS) aus kommunalen Kläranlagen wird der überwiegende Teil verbrannt. Seit dem Deponierungsverbot für unbehandelte organikhaltige Abfälle ab dem 01.06.2005 kann eine deutliche Zunahme der thermischen Klärschlammbehandlung beobachtet werden (Anstieg auf einen Anteil von etwa 64%). Die thermische Klärschlammbehandlung erfolgt zumeist in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen, Zement- und Kohlekraftwerken sowie in Abfallverbrennungsanlagen. Der Anteil der bodenbezogenen Klärschlammverwertung – landwirtschaftliche und landschaftsbauliche Nutzung – nimmt dagegen seit einigen Jahren ab. Während 2012 noch mehr als 45 % der Klärschlämme über diesen stofflichen Nutzungspfad entsorgt wurden, waren es in 2016 nur noch 35 % [DESTATIS B]. Zurückgeführt werden kann dies unter anderem auf steigende Qualitätsanforderungen sowie Ausbringungsbeschränkungen (Düngerecht).

Ziel dieser Broschüre ist es, den aktuellen Stand der Entsorgung kommunaler Klärschlämme in der Bundesrepublik Deutschland darzulegen und die Möglichkeiten für deren nachhaltige Verwertung aufzuzeigen. Die anstehende Aufgabe besteht in den nächsten Jahren darin, schrittweise die bodenbezogenen Klärschlammverwertung einzuschränken, aber gleichzeitig die Nährstoffe des Klärschlammes – insbesondere den enthaltenen Phosphor – weiterhin effizient, z. B. zu Dünge Zwecken, zu nutzen.



01

Grundlagen

- ▶ Was ist Klärschlamm?
- ▶ Wo fällt Klärschlamm an?
- ▶ Relevante Rechtsvorschriften für die Klärschlamm Entsorgung

Was ist Klärschlamm?

Der durchschnittliche Trinkwasserverbrauch beträgt in Deutschland je Einwohner und Tag etwa 120 Liter. Das verbrauchte Wasser gelangt als Abwasser in die Kanalisation und von dort in die angeschlossenen Kläranlagen. Hinzu kommt das Abwasser gewerblicher Betriebe (Indirekteinleiter) und Regenwasser (bei Mischkanalisation). Auf den Kläranlagen wird das Abwasser in verschiedenen Reinigungsstufen mechanisch-biologisch bzw. chemisch behandelt, d.h. weitestgehend von Schmutz- und Nährstoffen befreit und anschließend behandelt in die Gewässer abgeleitet. Übrig bleibt der sogenannte Klärschlamm.

Klärschlamm entsteht sowohl in kommunalen als auch in betrieblichen Kläranlagen. Vorliegen kann Klärschlamm entwässert, getrocknet oder in anderweitig behandelter Form. Rohschlamm ist Klärschlamm, der Kläranlagen unbehandelt entnommen wird.

Für eine stoffliche Verwertung im Sinne der Klärschlammverordnung (siehe AbfKlärV S. 9 ff) sind nur Klärschlämme aus Abwässern kommunaler Kläranlagen geeignet oder Klärschlämme aus betrieblichen Abwässern, die bezüglich der stofflichen Zusammensetzung dem kommunalen Abwasser vergleichbar sind. Dies kann zum Beispiel der Fall sein, wenn Produktionsabwässer gemeinsam mit Sanitärabwässern behandelt werden. Als Klärschlamm im Sinne der Klärschlammverordnung gelten auch Klärschlammgemische und Klärschlammkomposte. Klärschlammgemische sind gemäß § 2 AbfKlärV Mischungen aus Klärschlamm mit anderen geeigneten Stoffen nach Anlage 2 Tabellen 7 und 8 der Düngemittelverordnung. Klärschlammkomposte sind kompostierte Klärschlammgemische [ABFKLÄRV].

Klärschlämme können durch verschiedene physikalische, chemische und mikrobiologische Parameter beschrieben werden. Zur Charakterisierung werden daher so genannte Schlammkennwerte herangezogen, die in Tabelle 1 dargestellt und erklärt sind. Neben den hier genannten Parametern gibt es noch weitere Begrifflichkeiten (z. B. Schlammindex oder Faulzeit), die in der Praxis zur Beschreibung von Klärschlämmen genutzt werden.

Ein hoher Glühverlust deutet auf einen hohen organischen Anteil im Klärschlamm hin. Die Verbrennung

von Klärschlamm hat unter anderem die Aufgabe, die organische Substanz, und damit auch die organischen Schadstoffe, im Klärschlamm zu zerstören. Aus diesem Grund ist der Glühverlust ein wichtiger Parameter zur Beschreibung der Brennbarkeit des Klärschlammes. Weiterhin ist der Wassergehalt eine wichtige Leitgröße, da durch einen zu hohen Wasseranteil der Heizwert des Brennmaterials herabgesetzt wird. Letztendlich reicht es nicht aus, den Klärschlamm mit einem Parameter zu beschreiben, da die Parameter auch immer in Verbindung miteinander stehen.

Tab. 1

Schlammkennwerte und ihre Bedeutung

Kennwert	Einheit	Erklärung
Trockensubstanz (TS) Trockenmasse (TM)	z. B.: kg, g, mg	Die nach einem festgelegten Trocknungsverfahren verbliebene Masse (Trockenmasse/-substanz) an Trockenschlamm. Bestimmung durch Abzug des Wassergehalts.
Trockensubstanzgehalt (TS _R)	z. B.: kg/m ³ , g/l	Die in einem bestimmten Volumen enthaltene Trockenmasse.
Trockenrückstand (TR)	%	Maß für den Gehalt an Feststoff der nicht abfiltrierten Schlammprobe bzw. den Anteil der Trockenmasse an der gesamten Schlammmasse. Bestimmung durch Verdampfung des Wassers.
Wasseranteil	%	Maß für den Gehalt an Wasser an der gesamten Schlammmasse. Bestimmung durch Verdampfen des Wassers.
Glührückstand (GR)	%	Maß für den anorganischen bzw. mineralischen Anteil in der Trockenmasse des Klärschlammes. Bestimmung durch Verglühen des Trockenmasserückstands.
Glühverlust (GV)	%	Anteil der organischen Substanz in der gesamten Trockenmasse des Klärschlammes. Bestimmung durch Verglühen des Trockenmasserückstands.
pH-Wert	-	Negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffion aktivität.
Schlammart	-	Betriebsdaten. Einteilung des Klärschlammes nach seinem Anfallort.
Schlammalter	d	Betriebsdaten. Bestimmung durch Verhältnis von der im Becken vorhandenen Bakterienmasse zur täglich mit im Überschussschlamm abgezogenen Bakterienmasse.

Quelle: [KOPP; RÄBIGER]

Wo fällt Klärschlamm an?

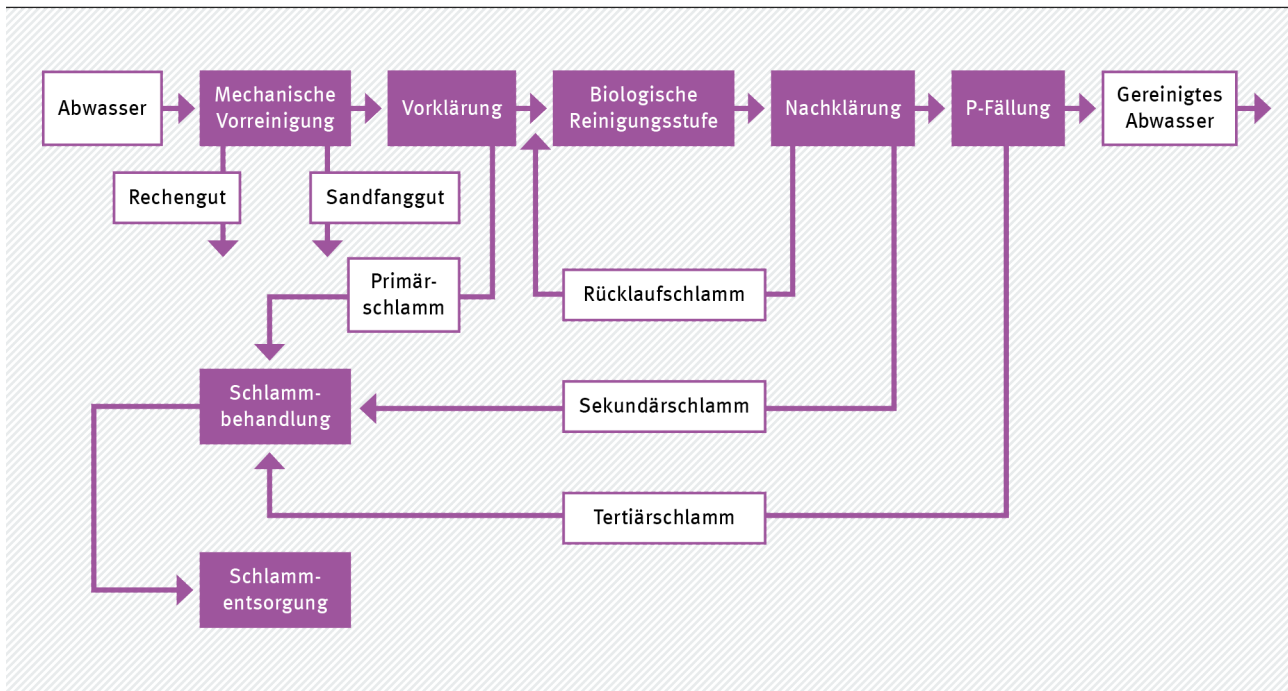
„Klärschlamm“ ist ein Sammelbegriff, bei dessen Verwendung nicht nach Herkunft und Art des Schlammes unterschieden wird. Auch getrockneter oder entwässerter Schlamm wird gemäß der Klärschlammverordnung als Klärschlamm bezeichnet. Die nach Art und Zusammensetzung verschiedenen Roh-

schlämme haben spezielle Bezeichnungen, je nachdem an welcher Stelle der Kläranlage sie anfallen.

Abbildung 1 zeigt die in einer Kläranlage anfallenden Schlämme in Abhängigkeit von der Reinigungsstufe.

Abbildung 1

Schlammfall auf der Kläranlage in Abhängigkeit von der Behandlungsstufe



Quelle: [EIGENE DARSTELLUNG]

Als Rohschlämme werden Primär-, Sekundär- und Tertiärschlämme in jeder beliebigen Mischung, die auf einer Kläranlage anfallen, bezeichnet. Rohschlämme sind unbehandelte Schlämme vor einer Stabilisierung (Mineralisierung der organischen Substanz durch biologisch-chemische Prozesse vor weiterer Klärschlammverwertung).

Der Primärschlamm entsteht in der mechanischen Stufe (Vorklärung) und ist somit das Resultat der eingesetzten physikalischen Verfahren zur Abtrennung absetzbarer Stoffe aus dem Abwasser. Seine Farbe reicht von grauschwarz über graubraun bis gelb. Der Schlamm enthält überwiegend leicht erkennbare Bestandteile wie Fäkalien, Pflanzenreste, Toilettenpapier etc. und geht nach der Entnahme aus dem System ohne weitere Behandlung schnell in Fäulnis mit entsprechender Geruchsintensität über.

In der biologischen Stufe anfallender Schlamm, Sekundärschlamm oder auch Überschussschlamm genannt, ist durch mikrobiellen Zuwachs entstanden. Dieser Schlamm ist meist bräunlich und zudem sehr viel homogener als der Primärschlamm. Nach seiner Entnahme aus dem System geht der Schlamm noch schneller in die Fäulnis über als der Primärschlamm.

Der in der kommunalen Abwasserbehandlung anfallende Schlamm aus der Phosphatfällung, d.h. aus der 3. Reinigungsstufe (Ausfällung von gelöstem Phosphor durch Einsatz von Eisen- oder Aluminiumsalzen, oder auch Kalk bzw. biologische Phosphorelimination) wird als Tertiärschlamm bezeichnet. Die Fällungsprozesse werden meist nicht in einer baulich getrennten Behandlungsanlage durchgeführt, sondern gemeinsam mit der Vorklärung oder der biologischen Abwasserbehandlung. Aus diesem Grund fallen Tertiärschlämme oftmals nicht getrennt, sondern als Gemisch mit Primär- oder Sekundärschlamm an. Die Schlammfärbung hängt von entsprechenden stofflichen Reaktionen ab. Tertiärschlämme unterscheiden sich in ihren rein chemischen Eigenschaften deutlich von Primär- und Sekundärschlämmen. Für gewöhnlich sind diese Schlämme stabil und zeigen keine geruchsmäßige Intensität. Weitere Schlammbezeichnungen sind Faulschlämme (Schlämme, die eine anaerobe Schlammstabilisierung, d.h. unter Luftabschluss, durchlaufen oder durchlaufen haben) oder stabilisierte Schlämme (alle Schlämme, die ein Stabilisierungsverfahren, sei es biologisch oder chemisch, durchlaufen haben) [BISCHOFBERGER et al.].

Relevante Rechtsvorschriften für die Klärschlamm Entsorgung

Im Folgenden werden die für die Entsorgung von Klärschlamm relevanten rechtlichen Regelungen vorgestellt. Dabei handelt es sich im Wesentlichen um Gesetze und Verordnungen, die die Klärschlammverbrennung und die bodenbezogene Verwertung regeln.



Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

Die rechtliche Grundlage für die Entsorgung von Abfällen und damit auch von Klärschlämmen ist das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) vom 24.02.2012, welches am 01.06.2012 in Kraft getreten und zuletzt am 20.07.2017 geändert worden ist. Das KrWG beinhaltet Regelungen zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen.

Ziel des Gesetzes ist eine nachhaltige Verbesserung des Umwelt- und Klimaschutzes sowie der Ressourceneffizienz in der Abfallwirtschaft durch Stärkung der Abfallvermeidung und des Recyclings von Abfällen. Deshalb schreibt das Gesetz eine fünfstufige Hierarchie bestehend aus Vermeidung – Vorbereitung zur Wiederverwendung – Recycling – sonstige Verwertung (d.h. auch energetische Verwertung und Verfüllung) – Beseitigung vor (§ 6). Mit Einführung der Fünf-Stufen-Hierarchie setzt Deutschland die Anforderungen der EU-Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG) um [EG]. Ausgehend von der genannten Rangfolge sollen solche Maßnahmen Vorrang haben, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleisten. Für die Betrachtung der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt ist der gesamte Lebenszyklus des Abfalls zugrunde zu legen. Hierbei sind insbesondere die zu erwartenden Emissionen, das Maß der Schonung der natürlichen Ressourcen, die einzusetzende oder zu gewinnende Energie sowie die Anreicherung von Schadstoffen in Erzeugnissen, in Abfällen zur Verwertung oder in daraus gewonnenen Erzeugnissen zu berücksichtigen.

§ 11 des KrWG sieht vor, dass zur Sicherung der ordnungsgemäßen und schadlosen Verwertung nähere Bestimmungen über die Verwendung von Klärschlämmen per Rechtsverordnung geregelt werden können. Auf dieser Rechtsgrundlage basiert die neue Klärschlammverordnung (vergl. AbfKlärV).

Darüber hinaus kann im Sinne von § 12 Absatz 1 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes eine freiwillige regelmäßige Qualitätssicherung zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und zur Sicherstellung des Schutzes von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Klärschlämmen eingerichtet werden. Entsprechende Mindestanforderungen werden in der novellierten AbfKlärV gestellt (vergl. AbfKlärV) [KRWG].

Sofern Klärschlamm thermisch entsorgt wird, legt das KrWG in §13 fest, dass für Anlagen geltende Betreiberpflichten durch die Vorschriften des Bundes-Immissionsschutzgesetzes einzuhalten sind.



Klärschlammverordnung (AbfKlärV) – Novelle 2017

Die Klärschlammverordnung (AbfKlärV) beruht auf den Ermächtigungsgrundlagen des KrWG und regelt die Bewirtschaftung von Klärschlämmen. Daneben gelten bei der bodenbezogenen Verwertung auch die Vorgaben des Düngerechts (siehe Seite 14 ff). Erstmals wird eine Pflicht zur Phosphorrückgewinnung für nicht stofflich verwertete Klärschlämme bzw. Aschen aus der thermischen Behandlung von Klärschlämmen eingeführt. Die novellierte Klärschlammverordnung ist als „Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung“ am 03.10.2017 in Kraft getreten und löst die Vorgängerverordnung von 1992 vollständig ab.

Gemäß § 1 regelt die Verordnung das Auf- und Einbringen von Klärschlamm, Klärschlammgemisch und Klärschlammkompost auf landwirtschaftlich, landbaulich, forstwirtschaftlich oder gärtnerisch genutzten Böden. Sie gilt für Klärschlämme, Klärschlammgemische und Klärschlammkomposte, die insbesondere in kommunalen Kläranlagen erzeugt wurden. Auch betriebs-eigene Anlagen, die dem kommunalen Abwasser vergleichbares Abwasser behandeln, fallen unter die Verordnung. Für Rohschlämme sowie Schlämme aus betrieblichen Anlagen, aus Anlagen der industriellen Kartoffelverarbeitung und aus den meisten Kleinkläranlagen besteht ein Aufbringungsverbot.

Klärschlammherzeuger sind nach § 3 der Verordnung dazu verpflichtet, den anfallenden Klärschlamm möglichst hochwertig zu verwerten und eine Rück-

führung des enthaltenen Phosphors in den Wirtschaftskreislauf anzustreben.

In §§ 4 und 5 der Verordnung werden Untersuchungspflichten für Klärschlammherzeuger geregelt. Die Probenuntersuchung, inklusive Probennahme und Probenvorbereitung, muss eine unabhängige und notifizierte Untersuchungsstelle durchführen. Der Klärschlammherzeuger kommt für die Kosten der Boden- und Klärschlammuntersuchungen auf.

Untersuchungen des Bodens, auf denen der Klärschlamm aufgebracht werden soll, sind gemäß § 4 AbfKlärV vor der ersten Aufbringung und danach im Abstand von zehn Jahren erforderlich. Der Boden ist dabei auf folgendes zu analysieren:

- ▶ Bodenart
- ▶ Schwermetalle: Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink gemäß Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV, Anhang 2, Nummer 4.1)
- ▶ pH-Wert
- ▶ Phosphatgehalt
- ▶ polychloriertes Biphenylene und Benzo(a)pyren.

Die Pflichten zur Untersuchung des Klärschlammes durch den Klärschlammherzeuger sind in § 5 AbfKlärV geregelt. Die Klärschlammuntersuchungen sind grundsätzlich je 250 t Trockenmasse (TM) (4-12 Analysen/Jahr) durchzuführen, Klärschlammkompost und Klärschlammgemische sind je angefangene 500 t TM (max. 12 Analysen/Jahr) zu analysieren. Die Analysen umfassen:

1. Gehalte an Arsen, Blei, Cadmium, Chrom, Chrom(VI), Kupfer, Nickel, Quecksilber, Thallium und Zink
2. Summe der organischen Halogenverbindungen als adsorbierte organisch gebundene Halogene
3. Gesamtstickstoffgehalt und Ammoniumgehalt
4. Phosphorgehalt
5. Trockenrückstand
6. organische Substanz
7. Gehalt an basisch wirksamen Stoffen insgesamt, bewertet als Calciumoxid
8. Eisengehalt
9. pH-Wert.

Vor der Abgabe und spätestens alle 2 Jahre müssen Klärschlämme, Klärschlammgemische und Klär-

schlammkomposte außerdem untersucht werden auf die Gehalte an:

1. polychlorierten Biphenylen
2. polychlorierten Dibenzodioxinen und Dibenzofuranen einschließlich dioxinähnlicher polychlorierter Biphenyle
3. Benzo(a)pyren
4. polyfluorierten Verbindungen mit den Einzelsubstanzen Perfluorooctansäure Perfluorooctansulfonsäure.

Nach § 7 der Klärschlammverordnung ist das Auf- oder Einbringen des Klärschlammes, Klärschlammgemischs oder des Klärschlammkomposts auf oder in den Boden nur erlaubt, wenn die Bodenuntersuchungen ergeben, dass die Vorsorgewerte der BBodSchV nicht überschritten werden (BBodSchV Nummer 4.3, Anhang 2). Die Abgabe und bodenbezogene Verwertung von Klärschlämmen ist nur zulässig, wenn die Grenzwerte der Klärschlammverordnung (Anlage 1) sowie der Düngemittelverordnung (DüMV, Anlage 2, Tabelle 1.4, Spalte 4; für Kupfer Anlage 1, Abschnitt 4.1, Spalte 6, Absatz 2) eingehalten sind. Eine Zusammenstellung der Grenzwerte findet sich in Kapitel 5, Tabelle 11.

Weiterhin müssen die Anforderungen an die Seuchen- und Phytohygiene nach Düngemittelverordnung (DüMV) eingehalten werden. Hier sind die Anforderungen nicht eingehalten, wenn in 50 g Klärschlamm Salmonellen gefunden werden oder andere widerstandsfähige Schadorganismen enthalten sind (DüMV, § 5, Absatz 1-3).

Die Auf- oder Einbringung eines Klärschlammes, Klärschlammgemischs oder Klärschlammkomposts ist nicht zulässig, wenn Böden genutzt werden als:

1. Grünland und Dauergrünland
2. Ackerfutteranbaufläche
3. Anbaufläche für Mais, ausgenommen zur Körnerernte und zur Verwendung in der Biogasproduktion, sofern keine Einarbeitung des Klärschlammes vor der Saat erfolgt ist
4. Anbaufläche für Zuckerrüben, sofern die Zuckerrübenblätter verfüttert werden sollen und im Anbaujahr keine Auf- oder Einbringung des Klärschlammes vor der Saat erfolgt ist
5. Anbaufläche für Gemüse, Obst oder Hopfen
6. Haus-, Nutz- oder Kleingarten oder

7. zu forstwirtschaftlichen Zwecken.

Wenn eine Ackerfläche zum Anbau von Feldgemüse genutzt wird, ist die Düngung mit Klärschlamm, Klärschlammgemischen oder Klärschlammkomposten nur erlaubt, sofern zwischen der letzten Auf- oder Einbringung und dem nächsten Anbau von Feldgemüse ein zeitlicher Abstand von mindestens 24 Monaten eingehalten wird.

Zudem ist die Verwendung von Klärschlamm nicht zulässig in:

1. Wasserschutzgebieten der Schutzzonen I, II und III sowie
2. Naturschutzgebieten, Nationalparks, nationalen Naturmonumenten, Naturdenkmälern, geschützten Landschaftsbestandteilen und gesetzlich geschützten Biotopen.

Die Aufbringungsmenge an Klärschlamm darf laut § 14 innerhalb von drei Jahren höchstens 5 t TM je Hektar betragen. Auf landbaulich genutzten Böden darf Klärschlamm einmalig bis zu einer Menge von 10 t/ha aufgebracht werden. Für Klärschlammgemische und Klärschlammkomposte gelten leicht abweichende Mengenvorgaben (siehe AbfKlärV).

Klärschlämme aus verschiedenen Kläranlagen dürfen gemäß § 15 nur unter bestimmten Bedingungen miteinander vermischt werden, z. B. wenn diese aus Anlagen desselben Klärschlammherstellers stammen (siehe AbfKlärV).

Die Vermischung von Klärschlamm mit Wirtschaftsdüngern (z. B. Gülle, siehe DüMV Anlage 2, Tab. 7 und 8) ist zulässig. Von dem Gemisch darf aber nur so viel ausgebracht werden, dass der Klärschlammanteil 5 t TM in drei Jahren nicht überschreitet (siehe AbfKlärV). Wird Klärschlamm in Güllegruben verbracht, so unterliegt das Gülle-Klärschlammgemisch, wie alle anderen Gemische mit Klärschlamm auch, der Klärschlammverordnung mit allen Beschränkungen und Untersuchungspflichten. Nicht zulässig ist die Ausbringung des Gemisches auf Grünland und die anderen bereits zuvor erwähnten Flächen mit Aufbringungsverbot für Klärschlamm (siehe AbfKlärV).

Für die Klärschlammverwertung muss ein Anzeige- und Lieferscheinverfahren eingehalten werden, welches in §§ 16-18 der Klärschlammverordnung ge-

regelt ist. Hier wurden in der novellierten Verordnung Anpassungen vorgenommen. Der Anwender hat die Ausbringungsmenge auf dem Lieferschein zu bestätigen. Je eine Durchschrift des Lieferscheines geht an Klärschlammnutzer, Transporteure, ggf. Qualitätszeichnehmer (bei qualitätsgesicherten Klärschlämmen) und Hersteller von Klärschlammgemischen oder -komposten sowie die zuständigen Behörden. Das Original verbleibt beim Kläranlagenbetreiber und ist von diesem 12 Jahre aufzubewahren. Im Vorfeld ist die geplante Klärschlammausbringung der zuständigen Behörde sowie dem Klärschlammherzeuger anzuzeigen.

Des Weiteren wird mit der novellierten Klärschlammverordnung gemäß § 12 des KrWG ein System zur freiwilligen Qualitätssicherung eingeführt. Dieses beinhaltet, dass eine Qualitätssicherung von externen Trägern der Qualitätssicherung durchgeführt werden kann. Aus der Qualitätssicherung, welche in §§ 20-31 geregelt wird, ergeben sich Erleichterungen bei der Verwertung qualitätsgesicherter Klärschlämme, Klärschlammgemische und Klärschlammkomposte (Untersuchungsumfang vermindert, Vorlagepflicht Untersuchungen gelockert, Klärschlammvermischung erleichtert, Befreiung vom Lieferschein möglich) (siehe Kapitel 5).

Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung

Als zentrales Element sieht die novellierte Klärschlammverordnung erstmals umfassende Vorgaben zur Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlämmen bzw. aus Klärschlammverbrennungsrückständen vor. Diese haben die Betreiber von Kläranlagen bzw. von Verbrennungsanlagen, in denen Klärschlämme verbrannt werden, nach Ablauf einer zweistufigen Übergangsfrist zu beachten. Die Pflicht zur Phosphorrückgewinnung greift etwa 12 Jahre nach Inkrafttreten der Verordnung, also am 01.01.2029, für Kläranlagen mit einer genehmigten Ausbaugröße von mehr als 100.000 Einwohnerwerten (EW). Circa 15 Jahre nach Inkrafttreten, also ab 01.01.2032, müssen auch Anlagen mit einer Ausbaugröße von mehr als 50.000 EW die neuen Regelungen einhalten. Für Kläranlagen kleiner 50.000 EW besteht die Möglichkeit, freiwillig Maßnahmen zur technischen Phosphorrückgewinnung zu ergreifen. Ab dem Jahr 2023 müssen Klärschlämme auf ihren Phosphorgehalt untersucht werden. Außerdem sind die Anlagenbetreiber dazu verpflichtet, einen Bericht über die geplanten und eingeleiteten Maßnahmen zur Sicherstellung der Phosphorrück-

gewinnung, zur bodenbezogenen Verwertung bzw. zur sonstigen Klärschlamm Entsorgung im Sinne des KrWG vorzulegen. In den Abbildungen 2 und 3 werden die künftigen Pflichten zur Phosphorrückgewinnung und die möglichen Verwertungswege dargestellt.

In Artikel 5 der neuen AbfKlärV werden die Anforderungen an die Rückgewinnung von Phosphor aus Klärschlamm bzw. der Asche aus thermischen Vorbehandlung von Klärschlamm geregelt. Demnach muss Klärschlamm einer Phosphorrückgewinnung (gem. Artikel 5 § 3 Abs. 1 Nr. 1 AbfKlärV) zugeführt werden, wenn der Phosphorgehalt im Klärschlamm $\geq 20 \text{ g/kg}$ Trockenmasse (TM) bzw. $\geq 2 \%$ beträgt.

Alternativ ist eine thermische Vorbehandlung in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen oder bestimmten Klärschlammmitverbrennungsanlagen mit anschließender Phosphorrückgewinnung möglich. Die erzeugte Klärschlammverbrennungsasche bzw. der kohlenstoffhaltige Rückstand muss in diesem Fall einer Phosphorrückgewinnung oder einer stofflichen Verwertung unter Nutzung des Phosphors zugeführt werden. Unter die Bezeichnung Klärschlamm(mit)verbrennung fallen Verfahren wie Monoverbrennung, Mitverbrennung (Befuerung mit Kohle oder Gas) oder auch unterstöchiometrische Verfahren wie Pyrolyse und Vergasung. Von

der Rückgewinnungspflicht ausgenommen sind Anlagen, die ausschließlich Klärschlamm mit einem Phosphorgehalt von $< 20 \text{ g/kg}$ TM thermisch behandeln.

Gemäß § 3a Abs. 1 sind auf der Kläranlage Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm anzuwenden, die eine Reduktion des Phosphorgehalts um mindestens 50 % (bezogen auf Klärschlamm TM) oder auf einen Gehalt von unter 20 g/kg TM gewährleisten. Eine Vermischung darf nur mit Schlämmen erfolgen, deren Phosphorgehalt ebenfalls mindestens 20 g/kg TM beträgt. Für die Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammverbrennungsasche oder kohlenstoffhaltigem Rückstand (§ 3b) sind Verfahren anzuwenden, die eine Rückgewinnung von mindestens 80 % des enthaltenen Phosphors gewährleisten. Außerdem ist vorgegeben, dass die Mitverbrennung von Klärschlämmen mit einem P-Gehalt $\geq 20 \text{ g/kg}$ nur in kohle- oder gasbefeuerten Feuerungsanlagen erfolgen darf. Laut Verordnung ist es ebenfalls möglich die Verbrennungsaschen oder kohlenstoffhaltigen Rückstände auf Deponien Langzeit zu lagern (vorzugsweise auf Monoabschnitten), wenn eine Vermischung mit anderen Stoffen bzw. Abfällen oder ein Verlust durch oberflächigen Abfluss ausgeschlossen sind und eine spätere Phosphorrückgewinnung bzw. -nutzung gewährleistet bleibt.

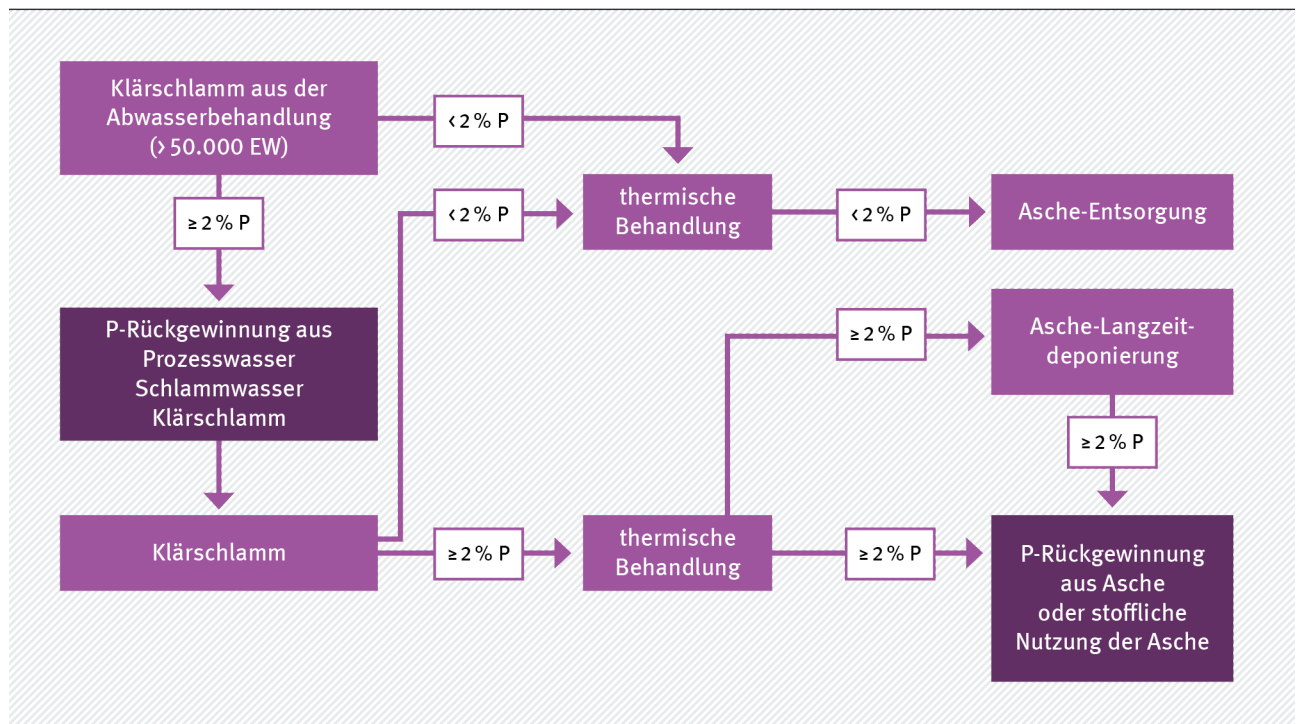
Abbildung 2

Künftige Pflichten zur Phosphorrückgewinnung gemäß novellierter Klärschlammverordnung

Abwasserbehandlungsanlagen	Ausbaugröße		Ausbaugröße
	$\leq 50.000 \text{ EW}$	$> 50.000 \leq 100.000 \text{ EW}$	$> 100.000 \text{ EW}$
aktuell	Bodenbezogene Verwertung möglich	Bodenbezogene Verwertung möglich	Bodenbezogene Verwertung möglich
in 2023	Berichtspflicht zu Maßnahmen der geplanten P-Rückgewinnung, zur bodenbezogenen Verwertung oder sonstigen Entsorgung Pflicht zu Untersuchungen auf P-Gehalt (und basisch wirksame Stoffe)		
ab 01.01.2029 (Übergangsfrist ca. 12 Jahre ab Inkrafttreten der AbfKlärV)	Bodenbezogene Verwertung möglich von P-Rückgewinnungspflicht ($P \geq 2 \%$) ausgenommen	Bodenbezogene Verwertung möglich von P-Rückgewinnungspflicht ($P \geq 2 \%$) ausgenommen	Bodenbezogene Verwertung nicht mehr zulässig P-Rückgewinnungspflicht ($P \geq 2 \%$)
ab 01.01.2032 (Übergangsfrist ca. 15 Jahre ab Inkrafttreten der AbfKlärV)	Bodenbezogene Verwertung möglich P-Rückgewinnungspflicht ($P \geq 2 \%$)	Bodenbezogene Verwertung nicht mehr zulässig P-Rückgewinnungspflicht ($P \geq 2 \%$)	Bodenbezogene Verwertung nicht mehr zulässig P-Rückgewinnungspflicht ($P \geq 2 \%$)

Abbildung 3

Künftig mögliche Entsorgungs- und Verwertungswege für Klärschlamm aus Kläranlagen über 50.000 EW (ab 2032)



Quelle: [ABFKLÄRV]

EU-Klärschlammrichtlinie

Die Richtlinie 86/278/EWG vom 12.06.1986 über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft hat zum Ziel, die bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm EU-weit in dem Maße zu regeln, dass schädliche Auswirkungen auf Böden, Vegetation sowie Mensch und Tier verhindert werden und gleichzeitig eine einwandfreie Verwendung der Schlämme gefördert wird [EWG 86]. Es wird angeführt, dass die Mitgliedstaaten strengere Bestimmungen, als in der Richtlinie vorgesehen, erlassen können.

Die Richtlinie gibt Grenzwerte für Schwermetalle in Schlämmen und Böden sowie für die Mengen an Schwermetallen, die pro Jahr auf den Böden aufgebracht werden dürfen, vor. Die Verwendung von Klärschlamm ist verboten, wenn die Konzentration von einem oder mehreren Schwermetallen die festgelegten Grenzwerte übersteigt. Die Richtlinie gibt darüber hinaus weitere zu analysierende Parameter vor und regelt die Intervalle in denen der Klärschlamm mindestens zu untersuchen ist.

Vor einer Verwendung in der Landwirtschaft müssen die Schlämme behandelt werden. Jedoch können hier

die Mitgliedstaaten auch die Verwendung unbehandelter Schlämme gestatten, wenn diese in den Boden eingespült oder eingegraben werden.

Die Richtlinie enthält auch einige Ausbringungsbeschränkungen. So darf auf Obst- und Gemüsekulturen während der Vegetationsperiode und auf Weiden oder Futteranbauflächen, vor Ablauf einer bestimmten Frist, kein Klärschlamm ausgebracht werden.

Die Richtlinie schreibt darüber hinaus fest, dass die Mitgliedstaaten der EU alle 3 Jahre einen Bericht über die ordnungsgemäße nationale Umsetzung der Klärschlammrichtlinie vorlegen müssen. Berichtet wird die erzeugte Schlammmenge, die in der Landwirtschaft verwendete Menge sowie die Zusammensetzung der Schlämme (91/692/EWG) [EWG 91].

HELCOM Recommendation

Die „Recommendation 38/1 on sewage sludge handling“ der HELCOM wurde im März 2017 verabschiedet. HELCOM ist eine zwischenstaatliche Kommission, die von den Ostsee-Anrainerländern gegründet wurde und Empfehlungen zum Schutz der Meeres-

umwelt im Ostseeraum ausspricht. Die Empfehlungen zur Klärschlammbehandlung beinhalten Folgendes:

- ▶ Nachhaltige landwirtschaftliche oder energetische Nutzung des Klärschlammes
- ▶ Vermeidung der Deponierung von Klärschlamm
- ▶ Gezieltes Recycling der enthaltenen Nährstoffe, insbesondere des Phosphors
- ▶ Reduktion von Einträgen umweltgefährdender und pathogener Stoffe in die Umwelt durch die Klärschlammnutzung
- ▶ Darstellung von Maßnahmen zur Klärschlammbehandlung inklusive zur Rückgewinnung von Phosphor
- ▶ Empfehlungen zu Ausbringungsbeschränkungen bei der landwirtschaftlichen Nutzung
- ▶ Anregungen zur Weiterentwicklung kosteneffizienter Lösungen und zum Wissensaustausch in der Region

Die Vertragsstaaten des Übereinkommens müssen im Zuge der Empfehlungen künftig regelmäßig zum Umgang mit Klärschlamm, zu dessen Qualität sowie zur Phosphorrückgewinnung berichten [HELCOM].

Düngerecht

Maßgebliche Regelungen des Düngerechts sind im Düngegesetz (DüngG), der Düngeverordnung (DüV) und der Düngemittelverordnung (DüMV) enthalten. Das Düngerecht wurde zuletzt 2017 überarbeitet. Die wesentlichen Inhalte, die sich auf die Verwendung von Klärschlamm beziehen, werden im Folgenden kurz skizziert.

Düngegesetz (DüngG)

Das Düngegesetz wurde am 15.05.2017 geändert und regelt insbesondere die Anforderungen an das Inverkehrbringen und die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Pflanzenhilfsmitteln und Kultursubstraten. Der Zweck dieses Gesetzes ist es, die Ernährung der Nutzpflanzen sicherzustellen, die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten oder zu verbessern und Gefahren für Mensch und Tier durch Düngemittel und andere Substrate im Sinne dieses Gesetzes vorzubeu-

gen oder sie abzuwenden. Hinsichtlich der Verwertung von Klärschlamm wurde ein Klärschlamm-Entschädigungsfonds eingerichtet (siehe § 11). Dieser soll Schäden an Menschen und Sachgütern ersetzen, die sich aus den Folgen der ordnungsgemäßen landwirtschaftlichen Verwertung von Klärschlamm ergeben. Die Beiträge zu diesem Fond sind durch die Hersteller oder Besitzer von Klärschlämmen zu entrichten, sofern diese die landwirtschaftliche Verwertung als Entsorgungsoption nutzen. Seit 01.01.2007 ruht die Beitragspflicht, da die finanzielle Ausstattung des Fonds den festgelegten Höchstbetrag erreicht hat.

Das Düngegesetz fordert zudem auch die Sicherstellung eines nachhaltigen und ressourceneffizienten Umgangs mit Nährstoffen bei der landwirtschaftlichen Erzeugung. Insbesondere sollen Nährstoffverluste in die Umwelt so weit wie möglich vermieden werden. Die Düngung darf nur nach guter fachlicher Praxis erfolgen, die bezüglich Art, Menge und Zeitpunkt der Anwendung am Bedarf der Pflanzen und am Nährstoffgehalt des Bodens ausgerichtet sein muss (vergl. § 3 Absatz 2) [DÜNGG].

Düngeverordnung (DüV)

Die neue Düngeverordnung trat am 02.06.2017 in Kraft, konkretisiert die Anforderungen an die gute fachliche Praxis bei der Anwendung von Düngemitteln und regelt deren Ausbringung auf landwirtschaftlich genutzten Flächen. Die Verordnung beinhaltet Aufbringungsbeschränkungen für stickstoff- und phosphathaltige Düngemittel in Abhängigkeit von Standort und Bodenzustand, regelt Sperrzeiten für die Aufbringung von Düngemitteln und macht Vorgaben zur Lagerung organischer Düngemittel.

Vor der Aufbringung von wesentlichen Nährstoffmengen an Stickstoff oder Phosphat (d.h. mehr als 50 kg Stickstoff oder 30 kg Phosphat je Hektar (ha) und Jahr) mit Düngemitteln und anderen Substraten im Sinne dieses Gesetzes ist der Düngebedarf (§§ 3 und 4) zu ermitteln. Bei Böden mit einem Phosphatgehalt von über 20 mg P₂O₅ je 100 g Boden (CAL-Methode, andere Methoden angeführt) darf maximal die Höhe der Phosphat-Abfuhr gedüngt werden. Hierbei ist es möglich die voraussichtliche P-Abfuhr innerhalb einer Fruchtfolge (maximal 3 Jahre) zu berücksichtigen. Berücksichtigt werden müssen dabei der Nährstoffgehalt des Düngemittels, der Nährstoffbedarf des Pflanzenbestandes für die unter den jeweiligen Standort-



und Anbaubedingungen zu erwartenden Erträge und Qualitäten, die im Boden verfügbare Nährstoffmenge sowie die Nährstoffnachlieferung aus dem Bodenvorrat (für Stickstoff). Die verfügbaren Stickstoffmengen sind auf jedem Schlag für den Zeitpunkt der Düngung (mindestens aber jährlich) über eine Bodenanalyse oder durch die Empfehlungen der zuständigen Stelle zu ermitteln. Für Phosphor sind die Nährstoffmengen dagegen auf Grundlage repräsentativer Bodenproben zu ermitteln, die für jeden Schlag ab einem Hektar, in der Regel im Rahmen einer Fruchtfolge, mindestens alle sechs Jahre durchzuführen sind [DÜV].

Des Weiteren sind besondere Vorgaben für die Anwendung von stickstoff- oder phosphathaltigen Düngemitteln (§ 5) zu beachten. Diese beinhalten u.a. das Verbot des Aufbringens, wenn der Boden überschwemmt, wassergesättigt, gefroren oder schneebedeckt ist. Abstände und Einschränkungen für das Aufbringen in der Nähe von oberirdischen Gewässern und hängigem Gelände werden ebenfalls vorgegeben.

Düngemittel mit wesentlichem Gehalt an Stickstoff, und somit auch Klärschlämme, dürfen nicht auf Ackerland aufgebracht werden ab dem Zeitpunkt, ab dem die Ernte der letzten Hauptfrucht abgeschlossen ist, bis zum Ablauf des 31. Januar des Folgejahres (Ausnahmen für Zwischenfrüchte, Winterraps, Feldfutter und Wintergerste nach Getreidevorfrucht).

Auf Grünland, Dauergrünland sowie auf Ackerland mit mehrjährigem Feldfutterbau bei einer Aussaat bis zum 15. Mai in der Zeit vom 1. November bis zum Ablauf des 31. Januar dürfen diese Düngemittel ebenfalls nicht eingesetzt werden (§ 6).

Der gemäß Verordnung durchzuführende Nährstoffvergleich (§ 8) beinhaltet eine Bewertung der Zu- und Abfuhr von Stickstoff und Phosphat für das abgelaufene Düngejahr. Die Kontrollwerte für die Differenz von Zu- und Abfuhr im Nährstoffvergleich werden sich künftig verringern. Laut Verordnung sind ab 2020 sind nur noch 50 kg Stickstoff je Hektar im 3-jährigen Mittel und ab 2023 nur noch 10 kg Phosphat je Hektar im 6-jährigen Mittel zulässig.

Gemäß der Verordnung sind die Bundesländer verpflichtet, in Gebieten mit hoher Nitratbelastung sowie in Gebieten, in denen oberirdische Gewässer durch Phosphat aus der Landwirtschaft eutrophiert sind, mindestens drei zusätzliche geeignete Maßnahmen aus einem vorgegebenem Katalog von 14 Maßnahmen zu erlassen. Mögliche weitergehende Regeln zum Phosphat-Einsatz in belasteten Gebieten sind das Begrenzen der zulässigen Phosphat-Düngermenge unter Phosphat-Abfuhr (= bei negativer Phosphat-Bilanz), das Verbot des Ausbringens von phosphathaltigen Düngern oder die Verlängerung der Sperrfrist für das Ausbringen von phosphathaltigen Düngern in eutro-

phierten Gebieten vom 15. November bis 1. Februar (Verlängerung um vier Wochen möglich). Für Gebiete mit hoher Nitratbelastung besteht dagegen u.a. die Möglichkeit den Kontrollwert auf 40 kg Stickstoff je Hektar zu reduzieren.

Düngemittelverordnung (DüMV)

Die Düngemittelverordnung vom 09.01.2009, zuletzt geändert am 26.05.2017, regelt das Inverkehrbringen von Düngemitteln, die nicht als EG-Düngemittel bezeichnet sind, sowie von Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln. Klärschlamm gehört gemäß der DüMV zu den organischen oder organisch-mineralischen Düngemitteln und ist als Hauptbestandteil für Düngemittel zugelassen. Auch Klärschlammverbrennungsaschen und verschiedene Recyclate aus der Phosphorrückgewinnung (Phosphatfällung, Schmelzvergasung) sind laut der Verordnung als Phosphatdüngemittel definiert (DüMV, Anlage 2, Tabelle 6) [DÜMV].

Klärschlämme müssen zusätzlich zur Klärschlammverordnung die Grenzwerte nach Anlage 2 Tabelle 1.4 der DüMV einhalten. Außerdem darf die Klärschlammabgabe nur erfolgen, wenn die Vorgaben nach Anlage 2, Tabelle 7, Zeile 7.4.3 eingehalten werden (siehe Kapitel 5, Tabelle 11).

Die Verordnung regelt außerdem die Anforderungen an die Seuchen- und Phytohygiene (§ 5) für Klärschlamm. Ein konkreter Grenzwert ist lediglich für Salmonellen angegeben (siehe DüMV, vergl. Kapitel 2).

Bei organischen Düngemitteln wie Klärschlamm ist neben dem Gehalt an Gesamtstickstoff künftig auch der Gehalt an verfügbarem Stickstoff zu kennzeichnen (DüMV, § 6 Abs. 1 Nr. 4).

Die Abgabe von Klärschlämmen mit synthetischen Polymeren, die als Flockungsmittel bei der Klärschlammwässerung eingesetzt werden, ist laut geltender Verordnung nur noch bis zum 31.12.2018 uneingeschränkt möglich (§ 10). Ab 01.01.2019 wird eine Abbaurate von 20% innerhalb von 2 Jahren (Polymerfracht von max. 45 kg Wirksubstanz je Hektar in 3 Jahren nicht überschreiten) vorgeschrieben. Gemäß § 9a der Verordnung werden bis zum 31.12.2019 unter Berücksichtigung der neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse die Anforderungen an synthetische Polymere überprüft.

EU Düngerecht

Aktuell wird die Europäische Düngemittelverordnung überarbeitet. Hier sollen auch neuartige Düngemittel aus Rückgewinnungsprodukten geregelt werden. Es zeichnet sich ab, dass es für diese Produkte eine erleichterte Zulassung angestrebt wird. Klärschlamm ist bisher nicht im Regelungsreich der Verordnung vorgesehen. Voraussichtlich wird die EU-Düngemittelverordnung nicht vor 2019 verabschiedet werden.

17. Bundes-Immissionsschutzverordnung (17. BImSchV)

Die 17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (17. BImSchV) vom 02.05.2013 gilt für die Errichtung, die Beschaffenheit und den Betrieb von Verbrennungs- oder Mitverbrennungsanlagen, in denen Abfälle eingesetzt werden. Die Verordnung gilt auch für Anlagen, die Klärschlamm (mit-)verbrennen.

Zur Limitierung von Emissionen werden Grenzwerte für Gesamtstaub, Schwefeloxide, Halogene, Stickstoffoxide, Quecksilber, Kohlenmonoxid, organische Verbindungen und Schwermetalle festgelegt.

Die Verordnung enthält Anforderungen, die bei der Errichtung und beim Betrieb der Anlagen zu erfüllen sind. Diese sind u.a.:

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

Wesentliche Vorgaben der Verordnung sind die Sicherstellung einer Nachverbrennungstemperatur von 850 °C für zwei Sekunden (nach der letzten Verbrennungsluftzuführung), die Reduzierung des Organikgehaltes in den Verbrennungsaschen auf unter 3% TOC bzw. 5% Glühverlust sowie die Verpflichtung des Betreibers, die Emissionswerte (überwiegend kontinuierlich) zu überwachen und an die zuständige Behörde zu übermitteln [17. BImSchV].



Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft)

Die Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft (TA Luft) ist die erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz. Sie enthält Immissions- und Emissionsanforderungen für Luftschadstoffe von gewerblichen und industriellen Anlagen, die gemäß der Verordnung über genehmigungsbedürftige Anlagen genehmigungsbedürftig (4. BImSchV) sind. Hinsichtlich der Klärschlammbehandlung ist die TA Luft insbesondere für Anlagen zum Trocknen von Klärschlämmen relevant (vergl. 5.4.8.10.2 TA Luft). Demnach müssen Klärschlamm-trocknungsanlagen so betrieben werden, dass die bei der Trocknung entstehenden Abgase direkt am Entstehungsort zu erfassen und einer Abgasreinigungseinrichtung zuzuführen sind. Es sind Emissionswerte für Ammoniak, Gesamtstaub, gasförmige anorganische Chlorverbindungen, organische Stoffe (angegeben als Gesamtkohlenstoff) sowie geruchsintensive Stoffe (500 GE/m³ Abgas) einzuhalten.



Deponieverordnung (DepV)

Die Deponieverordnung (DepV) vom 27.04.2009, zuletzt mit der Neufassung der AbfklärV geändert am 27.09.2017, regelt die Errichtung, den Betrieb, die Stilllegung und die Nachsorge von Deponien. Entsprechend der Gefährlichkeit der Abfälle werden in dieser Verordnung zur Abfallablagerung fünf Deponieklassen (DK) mit unterschiedlichen Ausstattungsmerkmalen definiert [DEPV]:

- ▶ **DK 0 – Deponie für Inertabfälle**
(nahezu unbelastete mineralische Abfälle)
- ▶ **DK I – Deponie für nicht gefährliche Abfälle**
(sehr gering belastete mineralische Abfälle mit sehr geringem organischen Anteil)
- ▶ **DK II – Deponie für nicht gefährliche Abfälle**
(gering belastete mineralische Abfälle mit geringem organischen Anteil)
- ▶ **DK III – Deponie für gefährliche Abfälle**
- ▶ **DK IV – Untertagedeponie**

Die Einordnung des vorliegenden Abfalls in die zutreffende Deponiekategorie wird anhand einer sogenannten Deklarationsanalyse ermittelt.

Die unterschiedlichen Ausstattungsmerkmale betreffen insbesondere die Ausführung der Basis- bzw. Oberflächenabdichtung, Messeinrichtungen zur Emissionsüberwachung, das Drainagesystem sowie die Sickerwasserreinigung bis hin zur verpflichtenden Errichtung eines Dichtungskontrollsystems bei der DK III. Weitere wesentliche Kernpunkte der Verordnung sind Regelungen zur Stilllegung und Nachsorge des Deponiekörpers.

In Deutschland ist die Ablagerung von Abfällen mit einem organischen Kohlenstoffanteil (bestimmt als TOC – Total Organic Carbon) auf Deponien der Klassen 0 und I von über 1 Masseprozent, der Klasse II von über 3 Masseprozent und der Klasse III von über 6 Masseprozent seit 2005 grundsätzlich unzulässig, so dass z. B. der Hausmüll oder Klärschlamm vor der Ablagerung auf einer Deponie mechanisch-biologisch oder thermisch vorbehandelt werden muss. Im Anhang 3 der DepV sind zulässige Überschreitungen dieser TOC-Grenzwerte beschrieben. Beispielsweise darf der TOC nach mechanisch-biologischer Behandlung maximal 18 Masse-% betragen und ist die Ablagerung mit Zustimmung der zuständigen Behörde auch bei unbegrenzter Überschreitung zulässig, wenn diese Überschreitung durch elementaren Kohlenstoff verursacht wurde.

Hinsichtlich der Langzeitlagerung von Aschen oder kohlenstoffhaltigen festen Rückständen der thermischen Klärschlammbehandlung ist der § 23 einschlägig. In diesem wurde eine Möglichkeit geschaffen, zum Zwecke einer späteren Rückgewinnung des Phosphors, solche Reststoffe – auch ohne einen schriftlichen Nachweis für die nachfolgende ordnungsgemäße und schadlose Verwertung oder gemeinwohlverträgliche Beseitigung – befristet für maximal fünf Jahre zu lagern. Die Befristung kann auf Antrag verlängert werden. Diese Lagerung wird nach Anlage 2 zum KrWG als R 13-Verfahren eingestuft, mithin als Verwertungsverfahren. Der bisherigen Verwertungsmöglichkeit von Klärschlammverbrennungsaschen im Untertageversatz, bei der der Phosphor in den Aschen unwiederbringlich verloren geht, wird nun ein Verwertungsverfahren entgegengestellt, bei dem der Phosphor später zurück gewonnen werden kann.

02

Zusammensetzung von Klärschlamm

- ▶ Schwermetalle im Klärschlamm
- ▶ Organische Verbindungen im Klärschlamm
- ▶ Krankheitserreger und Hygieneanforderungen am Beispiel EHEC
- ▶ Arzneimittelrückstände im Klärschlamm
- ▶ Nanomaterialien im Klärschlamm
- ▶ Kunststoffe im Klärschlamm

Klärschlamm kann als Vielstoffgemisch bezeichnet werden. Durch die Inhomogenität und die stark schwankenden Anteile seiner Bestandteile ist es schwer, eine einheitliche Standardzusammensetzung von Klärschlamm zu definieren.

Klärschlamm besteht zum größten Teil aus organischen Substanzen. Der Klärschlamm (also stabiliertes Primär-, Sekundär- und Tertiärschlamm, der als Gemisch am Ende der Klärkette entsteht, siehe Kapitel 1) enthält neben Pflanzennährstoffen wie Stickstoff und Phosphor, auch bedenkliche organische Substanzen (z. B. Arzneimittelrückstände), Schwermetalle, pathogene Organismen sowie diverse anthropogene mikro- und nanoskalige Bestandteile.

Die folgende Tabelle 2 enthält Merkmale zur Charakterisierung von kommunalem Klärschlamm. Die Daten stützen sich auf eine Veröffentlichung der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA) [DWA 387]. Weitere Werte, die von einer Studie des Österreichischen Umweltbundesamtes [OLIVA et al.] vorlagen, wurden in der Tabelle zur Vervollständigung ergänzt.

Tab. 2

Zusammensetzung des Klärschlammes nach [DWA 387] und [OLIVA et al.]

Stoff	Einheit	Wertebereich nach DWA	Stoff	Einheit	Wertebereich nach DWA
pH-Wert	–	7,7*	Chrom (Cr)	mg/kg (roh)	50–80
Trockensubstanzgehalt (TS)	Gew.-%	30,5*	Kupfer (Cu)	mg/kg (roh)	300–350
Glühverlust (GV)	%	45–80**	Mangan (Mn)	mg/kg (roh)	600–1.500
Wasser	Gew.-% (roh)	65–75	Nickel (Ni)	mg/kg (roh)	30–35
Asche	Gew.-% (roh)	30–50	Selen (Se)	mg/kg (roh)	1–5
Flüchtige Bestandteile	Gew.-% (roh)	30	Thallium (Th)	mg/kg (roh)	0,2–0,5
Flüchtige Bestandteile	Gew.-% (wf)	40–65	Vanadium (V)	mg/kg (roh)	10–100
Unterer Heizwert (Hu)	MJ/kg (roh)	1–2/10–12***	Quecksilber (Hg)	mg/kg (roh)	0,3–2,5
Kohlenstoff (C) ges.	Gew.-% (waf)	33–50	Zink (Zn)	mg/kg (roh)	100–300
Sauerstoff (O) ges.	Gew.-% (waf)	10–20	Zinn (Sn)	mg/kg (roh)	30–80
Wasserstoff (H) ges.	Gew.-% (waf)	3–4	AOX	mg/kg TS	200–400****
Stickstoff (N)	Gew.-% (waf)	2–6	PCDD/F	ng/kg TE	5–100****
Schwefel (S) org.	Gew.-% (waf)	0,5–1,5	PCB6	mg/kg TS	0,01–0,02****
Fluor (F)	Gew.-% (roh)	ca. 0,01	PAK	mg/kg TS	1–50***
Chlor (Cl)	Gew.-% (roh)	0,05–0,5	Molybdän (Mo)	g/kg TS	3,9*
Phosphor (P)	g/kg (roh)	2–55	Kobalt (Co)	g/kg TS	6,53*
Antimon (Sb)	mg/kg (roh)	5–30	Calcium (Ca)	g/kg TS	71*
Arsen (As)	mg/kg (roh)	4–30	Kalium (K)	g/kg TS	2,63*
Blei (Pb)	mg/kg (roh)	70–100	Magnesium (Mg)	g/kg TS	9,17*
Cadmium (Cd)	mg/kg (roh)	1,5–4,5			

Anmerkungen: roh = Bezug auf Originalsubstanz im Anlieferungszustand;
waf = wasser- und aschefrei; wf = wasserfrei

* Werte stammen aus [OLIVA et al.]; Median, nach [BOUBELA et al.]

** Werte stammen aus [OLIVA et al.]; nach [IWA – TU-Wien]

*** Werte für Trockenschlamm > 85% TR

**** Werte Europäischer Klärschlämme stammen aus [OLIVA et al.]; nach [FÜHRACKER/BURSCH]

Schwermetalle im Klärschlamm

Hauptquelle für Schwermetalle im kommunalen Klärschlamm ist der Austrag aus Haushalten und Gewerben. Schwermetalle gelangen aber auch über Niederschlagswasser von künstlichen Oberflächen ins Abwasser. Blei, Cadmium, Kupfer und Zink werden beispielsweise über Gebäudeflächen, Rohre, Bremsbeläge oder Stromleitungen ins Abwasser und damit in den Klärschlamm eingetragen [OLIVA et al.].

Tabelle 3 enthält die mittleren Konzentrationen an Schwermetallen im in Deutschland landwirtschaftlich eingesetzten Klärschlamm und deren Entwicklung über die letzten Jahre. Aufgelistet sind die durch die Klärschlammverordnung bzw. das Düngerecht geregelten Schwermetalle in mg pro kg Trockensubstanz.

Tab. 3

Konzentrationen von sieben Schwermetallen, sowie von Stickstoff und Phosphor im landwirtschaftlich genutzten Klärschlamm in Deutschland zwischen 1977 und 2015 [BMUB]

mg/kg TS	Pb	Cd	Cr	Cu	Ni	Hg	Zn	N-gesamt	P-gesamt
1977	220	21	630	378	131	4,8	2.140	k. A	k. A
1982	190	4,1	80	370	48	2,3	1.480	k. A	k. A
1986–1990	113	2,5	62	322	34	2,3	1.045	k. A	k. A
1998	63	1,4	49	289	27	1	835	k. A	k. A
2001	53	1,2	45	304	27	0,8	794	39.357	27.337
2002	50	1,1	45	306	27	0,7	750	38.846	22.019
2003	48	1,1	42	305	27	0,7	746	40.328	22.559
2004	44,3	1,02	40,7	306,3	25,8	0,62	756,7	42.025	23.581
2005	40,4	0,97	37,1	306,4	25,2	0,59	738,2	42.457	24.312
2006	37,2	0,96	36,7	300,4	24,9	0,59	713,5	43.943	24.531
2007	40,7	0,97	34,9	307,3	26,6	0,59	752,9	44.369	23.675
2008	38,5	0,96	33,6	297,4	25,4	0,54	744,1	44.167	23.591
2009	37,2	0,96	32,8	295,8	24,8	0,52	758,4	44.732	23.993
2010	37,5	0,96	33,2	304,7	25,2	0,53	774	45.943	23.758
2011	34,9	0,98	34	292,3	25,6	0,49	768,3	44.538	23.627
2012	33,4	1	32,6	305,3	25,1	0,5	763,5	46.046	26.727
2013	33,3	0,94	32,9	308,6	25,5	0,48	769,8	44.405	25.200
2014	32	0,87	33,8	307,3	26	0,47	799,7	45.247	25.546
2015	30,6	0,74	32,6	293,6	24,7	0,39	772,8	43.796	24.576
Änderung von 1977 (=100) auf 2015	-86,07	-96,49	-94,83	-22,34	-81,15	-91,83	-63,89	k. A.	k. A.
Änderung von 2001 (=100) auf 2015	-42,18	-38,54	-27,55	-3,43	-8,54	-50,99	-2,67	11,3	-10,1

Quelle: [BMUB]

Tabelle 3 zeigt, dass die aktuell ermittelten Schwermetallkonzentrationen von Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Quecksilber und Zink gegenüber 1977 deutlich abnahmen und heute teilweise eine Größenordnung unter der ursprünglichen Konzentration liegen. Dabei kann jeweils die deutlichste Konzentrationsabnahme im Zeitraum bis 2001 ausgemacht werden.

Auffällig ist, dass sich der Phosphorgehalt seit 2001 um etwa 10 % verringerte, während der Stickstoffanteil im gleichen Zeitraum um etwa 11 % zunahm. Weiterhin kann beobachtet werden, dass die Zinkkonzentration seit 2006 ansteigt und aktuell wieder auf dem Niveau von 2001 liegt, was auf eine stetige Zunahme des Einsatzes zinkhaltiger Werkstoffe in Wirtschaft und Technik (z. B. Dachrinnen und Dacheindeckungen) zurückgeführt werden kann.

Die Konzentrationen der Schwermetalle Kupfer und Nickel haben sich in den letzten 15 Jahren nur unwesentlich verändert und schwanken um Werte von 300 (Kupfer) bzw. von 25 mg/kg TS (Nickel). Die Abnahme von Quecksilber und Cadmium in Deutschland ist im Wesentlichen durch die geringere Verwendung in verschiedenen Produkten zu erklären, aber beispielsweise auch durch den Einsatz von Amalgamabscheidern in Zahnarztpraxen. Auch die Europäische Kommission möchte mit ihrer Quecksilberstrategie den Einsatz von Quecksilber weiter limitieren. Die Darstellungen für den Verlauf der Konzentration von Cadmium, Kupfer, Zink, Nickel, Chrom, Quecksilber und Blei im landwirtschaftlich genutzten Klärschlamm finden sich im Anhang II.

Organische Verbindungen im Klärschlamm

Der organische Anteil des Klärschlammes kann etwa 45 bis 90 % in der Trockensubstanz betragen. Dieser besteht zum größten Teil aus Bakterienmasse und setzt sich hauptsächlich aus den Elementen Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel zusammen (vergl. Tabelle 2). Im Klärschlamm enthalten sind auch Verunreinigungen durch eine Vielzahl organischer Schadstoffe. Zu den besonders kritischen Stoffen gehören neben den polychlorierten Dibenzodioxinen und -furanen (PCDD/F) auch Halogenverbindungen und Organozinnverbindungen. Perfluorierte Tenside (PFT), polychlorierte Biphenyle (PCB) und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) sind ebenfalls im Klärschlamm zu finden. Diese organischen Stoffe entstammen häufig einer Vielzahl von Quellen aus Haushalten und Gewerben, darunter fallen Putz- und Reinigungsmittel oder Körperpflegeprodukte. Weitere anthropogene (d.h. vom Menschen verursachte) Quellen sind Heimwerkerchemikalien wie Holzschutzmittel, Oberflächenbeschichtungen, Biozide in Bauprodukten und Arzneimittel.

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse einer landesweiten Untersuchung in Nordrhein-Westfalen aus dem Jahr 2006 zur Ermittlung von Klärschlammbelastungen mit organischen Schadstoffen.

Es kann festgehalten werden, dass die angeführten Schadstoffe und deren Konzentrationen hauptsächlich durch die Einzugsgebiete bzw. die angeschlossenen Haushalte und Betriebe bestimmt werden [OLIVA et al.].

Tab. 4

Konzentrationen an organischen Verbindungen im Klärschlamm aus Nordrhein-Westfalen

Stoffgruppe	Organische Schadstoffe	Mittelwert in [mg/kg TM]	90. Perzentil in [mg/kg TM]
Chlorphenole	Triclosan	3,4	5,5
Organozinnverbindungen	Dibutylzinn	0,22	0,35
	Diocetylzinn	0,056	0,05
	Monobutylzinn	0,17	0,32
	Monooctylzinn	0,031	0,043
	Tetrabutylzinn	0,0067	0,0025
	Tributylzinn	0,033	0,065
Polychlorierte Dibenzodioxine und -furane	PCDD/F I-TEQ	14 ng TE kg TR	22 ng TE kg TR
Polybrom. Diphenylether	Tetrabromdiphenylether	0,026	0,037
	Pentabromdiphenylether	0,048	0,063
	Hexabromdiphenylether	0,011	0,011
	Heptabromdiphenylether	0,013	0,0058
PAK	Decabromdiphenylether	0,57	1,06
	Benzo(a)pyren	0,47	0,73
	Chrysen	0,64	1,11
	PAK EPA (ohne Acenaphthylen)	6,64	9,52
Polychlorierte Biphenyle	PCB6 Summe	0,091	0,17
Phthalate	DEHP	27,5	57,5
	Dibutylphthalat	0,55	1
Tenside	LAS	1.723	4.000
	Nonylphenol	21,5	44,2

Quelle: [FRAGEMANN/BAROWSKI]

Krankheitserreger und Hygieneanforderungen

Mit dem Klärschlamm werden auch Krankheitserreger wie Bakterien, Viren, Parasiten und Wurmeier aus dem Abwasser abgeschieden. Soll der Schlamm in der Landwirtschaft verwertet werden, so ist nicht auszuschließen, dass Krankheitserreger über Nahrung und Futtermittel zu Mensch und Tier gelangen und diese damit gefährden können [GUJER].

Diese potentielle Gefährdung ist seit einigen Jahren verstärkt Gegenstand der Diskussion um eine mögliche Übertragung von Krankheitserregern auf den Menschen als Folge der Verwertung von Klärschlamm und anderen organischen Materialien auf landwirtschaftlichen Flächen. Die EHEC-Epidemie im Mai und Juni 2011, die durch den EHEC-Erreger O104:H4 ausgelöst wurde, führte der Öffentlichkeit vor Augen, wie wichtig eine solche Risikoabschätzung ist. Um die möglichen Risiken in diesem Zusammenhang bewerten zu können, müssen zwei Dinge erfüllt sein: Erstens muss die Überlebensfähigkeit der Erreger bekannt sein und zweitens die Wahrscheinlichkeit ermittelt werden können, mit der Mensch und Tiere mit Klärschlamm in Berührung kommen. Die größte Überlebensfähigkeit unter den Krankheitserregern haben Bakterien, die Sporen bilden können, z. B. Clostridien, außerdem Parasiten, die Dauerstadien (bzw. Sporen) bilden können (z. B. Giardien und Cryptosporidien), sowie Wurmeier. Bakterien, die keine Sporen bilden, überleben in der Regel nur wenige Wochen bis Monate.



Über die Überlebensfähigkeit des EHEC-Erregers O104:H4 in der Umwelt ist noch immer wenig bekannt. Da der Epidemiestamm Eigenschaften zweier pathogener (krankheitsauslösender) *E. coli* Typen (EHEC und EAggEC) besitzt, kann für eine Risikoabschätzung im Moment nur auf Eigenschaften dieser pathogenen *E. coli* sowie von apathogenen *E. coli* zurückgegriffen werden. Da EAggEC Bakterien zur Aggregation der Bakterienzellen neigen und Biofilme bilden, könnte der *E. coli* Epidemiestamm O104:H4 auch in der Umwelt in Biofilmen verstärkt persistieren. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass der EHEC-Stamm O157:H7 über viele Monate in verschiedenen Böden und unter vielfältigen experimentellen Bedingungen überleben kann. Daher ist anzunehmen, dass auch der Epidemiestamm im Boden ggf. monatelang überlebt.

Im Zusammenhang mit aktuellen hygienischen Fragestellungen diskutiert die Fachwelt die Verbreitung resistenter Bakterien und bakterieller Resistenzgene in die Umwelt [UBA 97]. Es gibt Hinweise darauf, dass es auf Kläranlagen zum Austausch von Antibiotikaresistenzen zwischen verschiedenen Bakterien kommen kann, da hohe Zelldichten, ausreichende Nährstoffgehalte und Selektionsdruck durch Mikroverunreinigungen ideale Bedingungen für die Anpassung von Bakterien durch Prozesse des horizontalen Gentransfers bieten. Dadurch ist es möglich, dass neue Kombinationen von Antibiotikaresistenzen entstehen oder dass Antibiotikaresistenzen auf Bakterien übertragen werden, die bisher keine Resistenz aufwiesen. Resistente Bakterien können sich über den Abwasserpfad oder über den Klärschlamm in der Umwelt weiter verbreiten. Bei der bodenbezogenen Klärschlammverwertung können diese Resistenzen direkt auf den Boden gelangen. Darüber hinaus beschreibt EIBISCH, dass der kontinuierliche Eintrag von Antibiotika in Böden über längere Zeit zu erhöhten Konzentrationen führen kann. Dadurch erhalten antibiotikaresistente Bakterien Wachstumsvorteile, sodass die Möglichkeit des Gentransfers ihrer Resistenzgene gegeben ist.

Da verschiedene Erreger eine hohe Überlebensfähigkeit aufweisen, muss für die Risikominimierung gewährleistet werden, dass Menschen und Tiere möglichst nicht mit ihnen in Berührung kommen. Um mögliche Risiken zu minimieren regeln das Düngerecht und die Klärschlammverordnung An-

forderungen an die bodenbezogene Ausbringung von Klärschlamm. So regelt § 5 der Düngemittelverordnung bestimmte seuchen- und phytohygienischen Anforderungen, die auch bei einer geplanten Klärschlammverwertung einzuhalten sind. Danach gelten die Anforderungen hinsichtlich seuchenhygienischer Eigenschaften als nicht eingehalten wenn in 50 g Probenmaterial Salmonellen zu finden sind. Hinsichtlich phytohygienischer Eigenschaften ist die Ausbringung untersagt, wenn widerstandsfähigen Schadorganismen (insbesondere von Schadorganismen laut Richtlinie 2000/29/EG), thermoresistente Viren (insbesondere aus der Tobamovirus-Gruppe) oder pilzliche Erreger mit widerstandsfähigen Dauerorganen (insbesondere *Synchytrium endobioticum*, *Sclerotinia*-Arten, *Rhizoctonia solani*, *Plasmodiophora brassicae*) enthalten sind, und die Klärschlämme nicht einer geeigneten hygienisierenden Behandlung unterzogen wurden (siehe DüMV, Kapitel 1).

Ergänzend zu diesen düngerechtlichen Vorgaben normiert die Klärschlammverordnung restriktive Regelungen für die Ausbringung von Klärschlamm. So sind in § 15 der Klärschlammverordnung Anwendungsbeschränkungen festgeschrieben. Klärschlamm

darf demnach weder auf Gemüse- und Obstanbauflächen noch auf Dauergrünland aufgebracht werden. Darüber hinaus bestehen Anwendungsbeschränkungen für Ackerflächen, die zum Anbau von Mais oder Zuckerrüben genutzt werden. Außerdem ist die Klärschlammverwertung in Wasserschutzgebieten der Zonen I bis III sowie in Naturschutzgebieten verboten (siehe AbfKlärV, Kapitel 1). Experten gehen davon aus, dass die bestehenden Regelungen ausreichen, um eine Verbreitung von EHEC und anderen Krankheitserregern durch die bodenbezogene Klärschlammverwertung in die Nahrungskette, das Grundwasser und Oberflächengewässer zu verhindern – sofern der Klärschlamm bestimmungsgemäß ausgebracht wird. Dies setzt allerdings eine lückenlose Überwachung der Entsorgung voraus. Insbesondere im Hinblick auf die zunehmenden Probleme bei der Behandlung bakterieller Infektionen durch das Auftreten von mehrfachresistenten Bakterien sollte die Relevanz der bodenbezogenen Klärschlammausbringung weiter untersucht und geklärt werden, ob die bisherigen Hygienemaßnahmen (Anforderungen nach Düngemittelverordnung, Auf- und Einbringungsbeschränkungen) künftig ausreichend sind.

Arzneimittelrückstände im Klärschlamm

Das Spektrum der zugelassenen Arzneimittelwirkstoffe ist groß. Auf dem deutschen Markt sind derzeit allein rund 2.300 verschiedene Wirkstoffe für den Humanarzneimittelbereich verfügbar, von denen etwa die Hälfte als potentiell umweltrelevant gilt. Als nicht umweltrelevant, weil in der Regel nicht toxisch oder sehr schnell abbaubar, gelten Substanzen wie traditionelle pflanzliche Arzneimittel, Elektrolyte, Vitamine, Peptide, Aminosäuren sowie viele natürlich in der Umwelt vorkommende Substanzen wie z. B. Mineralien. Von den rund 1.200 Humanarzneimittelwirkstoffen mit möglicher Umweltrelevanz wurden im Jahr 2012 in Deutschland insgesamt 8.120 t verbraucht [IMS]. Das ist gegenüber 6.200 t im Jahr 2002 ein Anstieg um mehr als 20% in 10 Jahren. Dabei entfielen 2/3 dieser Menge auf nur 16 Wirkstoffe, deren Verbrauch über 80 t lag. Die am häufigsten verwendeten Humanarzneimittel sind Antidiabetika wie z. B. Metformin, Entzündungshemmer und Schmerzmittel wie beispielsweise Ibuprofen,

Asthmamittel sowie Psychotherapeutika [SCHWABE/PAFFRATH in EBERT].

Abhängig von den angewendeten Abwasserbehandlungstechniken wird ein mehr oder weniger großer Teil der Arzneimittelrückstände aus dem Abwasser in Klärschlämmen angereichert. Wird der Klärschlamm in der Landwirtschaft eingesetzt, können mit der enthaltenen Nährstofffracht u. a. auch Arzneimittelrückstände auf die Felder gelangen. Dort können sie sich im Boden anreichern, mit dem Sickerwasserfluss in das Grundwasser gelangen oder durch Oberflächenabfluss direkt in Oberflächengewässer eingetragen werden.

Existieren zu Arzneimittelrückständen im Abfluss von Kläranlagen und in Oberflächengewässern zahlreiche Untersuchungen, so liegen zu den Arzneimittelgehalten in Klärschlämmen und deren Verhalten im Boden nur wenige belastbare Ergebnisse vor. Dies scheint auch im Zusammenhang damit zu stehen,

dass ein analytischer Nachweis der Verbindungen vor allem im Medium Boden erschwert wird, da viele dieser Stoffe an der organischen Substanz in Böden fest gebunden werden und erst durch aufwändige Extraktionsverfahren wieder gelöst werden müssen.

Die Eliminationsrate von Arzneistoffen in den Kläranlagen über Abbauprozesse aber auch Sorption, also die Aufnahme durch oder die Anhaftung an die organischen Bestandteile des Klärschlammes, ist sehr unterschiedlich. Nach BOXALL et al. neigen vor allem Arzneimittel mit größerem Molekulargewicht und unpolarem Charakter, wie einige Antibiotika, zu einer stärkeren Sorption. GOLET et al. erklären die Eliminierung aus dem Abwasser von 88 bis 92% hauptsächlich mit einer Anreicherung im Klärschlamm. Sie wiesen die Antibiotika Ciprofloxacin und Norfloxacin aus der Gruppe der Fluorchinolone mit Gehalten von bis zu 3,5 mg/kg im Klärschlamm nach. In mit Klärschlamm gedüngten Böden wurden von den Autoren Gehalte von bis zu 0,45 mg/kg Boden der entsprechenden Substanzen nachgewiesen, die sich zudem durch hohe Persistenz auszeichnen, also lange in der Umwelt verbleiben.

In einer Studie des Umweltbundesamtes [KONRADI] wurden auf der Grundlage des Vorkommens und Verhaltens von Arzneimittelrückständen in Kläranlagen, des Vorkommens und Verhaltens von Humanarzneimittelrückständen in Böden und den ökotoxikologischen Effekten von Humanarzneimittelrückständen auf Bodenorganismen die Antibiotika Ciprofloxacin und Clarithromycin, das Antiepileptikum Carbamazepin sowie das Hormon Ethinylestradiol als Indikatormoleküle für ein Monitoring der Arzneimittelbelastungen von Klärschlamm vorgeschlagen. Auf der Grundlage dieser Vorschläge wurde in einem Forschungsvorhaben im Auftrag des Umweltbundesamtes [STENZEL et al.] im Faulschlamm 3 bis 21 mg Ciprofloxacin/kg TS, 1,1 bis 8,9 mg Levofloxacin/kg TS, 0,21 bis 1,1 mg Carbamazepin/kg TS, bis zu 0,16 mg Clarithromycin/kg TS und bis zu 0,73 mg beta-Estradiol/kg TS nachgewiesen.

In einem Gutachten des IWW im Auftrag des Umweltbundesamtes [BERGMANN et al.], das Literatur zu Monitoringdaten von Arzneimitteln in der Umwelt zusammenstellte, wird neben Nachweisen der bereits erwähnten Antibiotika Ciprofloxacin und Norfloxacin auch über Funde der Antibiotika Doxycyclin, Clarithromycin, Roxithromycin und Trimethoprim, des

Antiepileptikums Carbamazepin, der Lipidsenker Bezafibrat, Fenofibrat und Gemfibrozil sowie des Betablockers Metoprolol berichtet. Die Gehalte überstiegen 100 µg/kg im Klärschlamm. Auch Östrogene wie 17-beta-Estradiol und 17-alpha-Ethinylestradiol wurden in Klärschlammproben gefunden.

STUMPE untersuchte den Abbau und die Mineralisation von steroiden Hormonen im Boden, die unter anderem durch die Düngung mit Klärschlamm auf die Äcker gelangen. Sie beobachtete, dass Östrogene stabile Verbindungen im Boden darstellen. Ihre Laborversuche haben gezeigt, dass Östrogene im Boden darüber hinaus einer vertikalen Verlagerung unterliegen und damit auch Beachtung in den ökologischen Risikoanalysen für Grundwasser und grundwasserbeeinflusste Oberflächengewässer finden sollten.

Antibiotika in Böden können durch die Pflanzenwurzeln aufgenommen werden und sich im Pflanzengewebe bis hin zum Korn anreichern [GROTE et al.]. Die nachgewiesenen Mengen liegen jedoch unter den gesundheitlichen Referenzwerten, die beispielsweise für Lebensmittel tierischer Herkunft vorliegen.

Es gibt diverse Anhaltspunkte für den Verbleib und die Akkumulation von Arzneimitteln in Böden in Folge der Beaufschlagung von Ackerflächen mit Klärschlämmen. Generell sind derzeit keine akuten Gefährdungen für Böden und die in und auf ihm lebenden Organismen sowie die menschliche Gesundheit durch mit Klärschlämmen eingetragene Arzneimittel bekannt. Über die Langzeitwirkungen von Arzneimitteln in Böden auf das Bodenleben und die Umwelt insgesamt sowie auf die menschliche Gesundheit liegen aber bisher nur unzureichende Kenntnisse vor.

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) weist in seiner Stellungnahme zu Arzneimitteln in der Umwelt darauf hin, dass sich nur wenige Arzneimittel im Klärschlamm anreichern. Auf Grund der Senkenfunktion des Klärschlammes empfiehlt er trotzdem eine schrittweise Abkehr von der landwirtschaftlichen Nutzung, um eine diffuse Verteilung der unerwünschten Begleitstoffe auf dem Boden vorsorglich zu vermeiden [SRU]. Im SRU-Gutachten zum Thema Arzneimittel in der Umwelt wird darüber hinaus die Vermutung geäußert, dass für die Resistenzausbreitung in der Umwelt der Eintrag von resistenten Bakterien von größerer Bedeutung ist als der Eintrag

der Antibiotika selbst [SRU]. Derzeit wird durch das Umweltbundesamt zu diesem Thema ein Forschungsvorhaben durchgeführt, in dem der Eintrag von resistenten Bakterien aus Abwasser bzw. Klärschlamm in Böden näher untersucht wird. So sollen Kenntnisse

über die Auswirkungen von Resistenzen auf Böden gewonnen sowie Vorschläge für anspruchsvollere Standards für die Klärschlammdüngung aus kleineren Kläranlagen unterbreitet werden.

Nanomaterialien im Klärschlamm

Ist von Nanomaterialien die Rede, sind Materialien gemeint, bei denen mindestens 50% der Partikel in der Anzahlgrößenverteilung mindestens ein Außenmaß aufweisen, das im Bereich von 1 bis 100 Nanometer (nm) liegt [EU], was in etwa einem Tausendstel des Durchmessers eines menschlichen Haares entspricht.

Nanomaterialien können natürlichen Ursprungs sein (z. B. feine Tonpartikel), bei Prozessen anfallen (z. B. Verbrennung) oder bewusst zu technischen Zwecken synthetisiert werden. Von besonderer Relevanz sind diese feinen Materialien als Bestandteil von Verbrauchsgütern bzw. Erzeugnissen beispielsweise der Elektronikbranche, Pharmazie, Medizin, Kosmetik, Flächenveredelung oder Chemie. Zinkoxid- und Titanoxidnanopartikel in Sonnenschutzmitteln aber auch Aluminiumverbindungen in Sprays sind prominente Beispiele in der zunehmend breiteren Anwendung.

Im Allgemeinen wird angenommen, dass von Nanomaterialien kein Risiko ausgehen sollte, solange sie fest in eine Matrix eingebunden sind und über den gesamten Produktlebenszyklus nicht freigesetzt werden. Werden Nanomaterialien in die Umwelt freigesetzt, können sie dort mit anderen Stoffen oder Organismen in Wechselwirkung treten und so gegebenenfalls schädlichen Einfluss auf die Umwelt nehmen. Für die standardisierte Untersuchung von Verhalten und Effekten von Nanomaterialien befinden sich Methoden derzeit in der Entwicklung. So wurde zum Beispiel vom Umweltbundesamt eine OECD Prüfrichtlinie zur Untersuchung des Einflusses wichtiger Umweltparameter auf die Stabilität von Nanomaterialdispersionen entwickelt und veröffentlicht [OECD; SCHWIRN/VÖLKER].

In bisherigen Untersuchungen wurde gezeigt, dass auf der Kläranlage etwa 90% der eingesetzten Nanomaterialien in den Klärschlamm gelangen [SCHWIRN/VÖLKER]. Inwieweit diese Stoffe aus dem Klärschlamm in die Umwelt weiter getragen werden können, hängt von der Wahl der Klärschlammverwertung ab. Bei der Klärschlammverbrennung können prinzipiell die Depositionspfade über das Abgas bzw. die Asche infrage kommen. In einem vom Umweltbundesamt initiierten Forschungsvorhaben wurde der Nachweis erbracht, dass die darin untersuchten nanoskaligen Titandioxidpartikel nach der Verbrennung von Klärschlamm oder Hausmüll vorwiegend fest in der Aschematrix eingebunden sind und die Emissionen über das Abgas vernachlässigbar gering sind [BÖRNER et al.]. Untersuchungen zum Freisetzungsverhalten der Nanomaterialien während der weitergehenden Aschebehandlung (Bruch, Mahlung, Klassierung, Sortierung etc.) sind Gegenstand laufender Forschungsarbeiten.

Kunststoffe im Klärschlamm

Mit dem Abwasser gelangen auch Kunststoffe zur Kläranlage. Sogenanntes Makroplastik (> 25 mm) wird bereits im Zuge der Vorklärung zum Beispiel durch Siebrechen mechanisch entfernt. Meso- (Mikropartikel aus Kunststoffen in der Größe von 5 bis 25 mm) und Mikroplastik (< 5 mm) durchlaufen die Kläranlage und verbleiben im Klärschlamm.

Die im Abwasser befindlichen Kunststoffe stammen zum Teil aus dem häuslichen Bereich (Zusatz in kosmetischen Mitteln und Detergenzien, sogenanntes primäres Mikroplastik), dem Abrieb von Textilien, der beim Waschen entsteht (als sekundäres Mikroplastik) oder dem Abrieb von anderen Hygieneprodukten aus Kunststoffen, die über den Abwasserpfad entsorgt werden. Die Einträge über Kosmetikprodukte sind in den zurückliegenden Jahren – auch aufgrund der freiwilligen Empfehlung des europäischen Industrieverbandes „Cosmetics Europe“ an seine Mitglieder zum Verzicht auf den Einsatz von Mikroplastik in Rinse-Off-Cosmetics – stark zurückgegangen. Auf der anderen Seite gibt es Einträge aus dem urbanen Raum, wenn über die Mischkanalisation Niederschlagswasser von Straßen und Plätzen der Kläranlage zugeleitet wird. Hier wird neben Makro- und Mesoplastik (z. B. Zigarettenkippen) auch Mikroplastik (z. B. Reifenabrieb) der Kläranlage zugeführt.

Kläranlagen sind auf Partikelabscheidung optimiert. Erste Untersuchungen zeigen, dass der überwiegende Teil an Feststoffen (und damit auch die Kunststoffe) auf der Kläranlage zurückgehalten werden. Diese zurückgehaltenen Stoffe finden sich dann entweder im Rechengut oder im Klärschlamm wieder.

Bei einer landwirtschaftlichen Verwertung des Klärschlammes findet ein entsprechender Eintrag an Kunststoffen in die Böden statt. Über die Langzeitwirkungen von Kunststoffpartikeln auf das Bodenleben und die Umwelt insgesamt liegen bisher nur unzureichende Kenntnisse vor.

Werden Klärschlämme einer thermischen Nutzung oder Beseitigung zugeführt, werden dadurch auch die Kunststoffe zerstört. Insofern können Kläranlagen zur Entfrachtung der Umwelt von Kunststoffen beitragen.

Insgesamt ist aber festzustellen, dass es aktuell keine validen Daten über das Vorkommen von Kunststoffen in Klärschlämmen gibt. Ein wesentlicher Grund ist die fehlende Untersuchungsmethodik. Das Bundesforschungsministerium hat zum Thema Kunststoffe in der Umwelt in 2017 einen Forschungsschwerpunkt gestartet, in dem auch in mehreren Projekten Kläranlagen untersucht werden.



03

Schlammbehandlung

Als Schlammbehandlung werden alle Verfahren bezeichnet, welche die Verwertbarkeit oder die Transport- und Lagerfähigkeit des Klärschlammes verbessern. Zu den Schlammbehandlungsverfahren gehören Eindickung, Hygienisierung, Stabilisierung, Entwässerung, Trocknung und Verbrennung [GUJER; BRANDT]. Auf die Verbrennung bzw. thermische Behandlung wird in Kapitel 4 gesondert eingegangen.

Eindickung

Die Eindickung hat das Ziel, dem Schlamm das Wasser soweit wie möglich zu entziehen und damit das Volumen zu reduzieren. Eindicker sind Absetzbecken in Form und Funktionsweise sehr ähnlich. Durch die Schwerkraft sollen die Teilchen im Schlamm zu Boden sinken und sich absetzen. Zusätzlich soll ein Krälwerk (Rührwerk) die Flokkung von Partikeln beschleunigen, wodurch sich diese schneller absetzen können. Am Boden der Eindicker wird der Schlamm abgezogen und an der

Oberfläche das überschüssige Wasser (freies Wasser) abgelassen [GUJER; DWA 379].

Hygienisierung

Die Hygienisierung hat zum Ziel pathogene Organismen (wie Bakterien, Viren, Einzeller oder Wurmeier) im Klärschlamm zu reduzieren, um bei einer bodenbezogenen Verwertung die Gefahr der Kontamination von Mensch, Tier und Umwelt zu minimieren. Hinsichtlich der Anforderungen an die Seuchen- und Phytohygiene ist § 5 der Düngemittelverordnung einzuhalten. Als bedenklich gilt ein Ausgangsstoff dann, wenn in 50 g Probe Salmonellen gefunden werden oder sogenannte widerstandsfähige Schadorganismen enthalten sind und keine hygienisierende Behandlung erfolgte. Die Ausbringung unterliegt dann bestimmten Auflagen (siehe Kapitel 1, DüMV). Tabelle 5 gibt einen Überblick über verschiedene Verfahren zur Hygienisierung von Klärschlamm, die im Zuge der Novellierung der Klärschlammverordnung diskutiert wurden.

Tab. 5

Chemische/physikalische/thermische Stabilisierungsverfahren zur Hygienisierung von Klärschlamm

Art des Verfahrens	Verfahren	Beschreibung
Erreichen der Behandlungstemperatur durch Fremderhitzung	Schlammpasteurisierung	Der Schlamm wird während einer Einwirkzeit von 60 Minuten und unter Zufuhr von Wärme auf über 70 °C erhitzt.
	Thermische Konditionierung	Die Konditionierung findet bei einem Druck von mindestens 15 bar, einer Temperatur von mindestens 80 °C und bei einer Einwirkzeit von mindestens 45 Minuten im Schlammreaktionsbehälter statt.
Erreichen der Behandlungstemperatur durch Selbsterhitzung/chemische Reaktionswärme	Aerob-thermophile Schlammstabilisierung (ATS)	Durch aktive Luft/Sauerstoff-Zufuhr werden exotherme mikrobielle Abbau- und Stoffwechsellvorgänge ausgelöst, die eine Erwärmung und eine pH-Wert-Erhöhung auf Werte um etwa 8 im Klärschlamm zur Folge haben. Werden ATS-Anlagen semikontinuierlich betrieben, müssen sie wenigstens zweistufig gebaut werden. Nur bei einer Mindesttemperatur von 55 °C und einer mindestens 22-stündigen Behandlungszeit im zweiten Behälter kann eine ausreichende Reduzierung der Schadorganismen sichergestellt werden.
	Schlammkompostierung in Mieten oder Reaktoren	Durch die mikrobielle aerobe Verrottung wird der Schlamm kompostiert. Die dafür nötige Wärme wird durch eben diese Abbauvorgänge geliefert. Dem Schlamm werden Strukturmaterialien wie z. B. Stroh, Sägespäne etc. zugegeben. Anfangswassergehalte des Mischgutes von 40 bis 60 % sind ideale Voraussetzungen für einen einwandfreien Kompostierungsablauf.
	Zugabe von ungelöschtem Branntkalk	Bei Zugabe von CaO zu entwässertem Klärschlamm erwärmt sich das Gemisch infolge exothermer Reaktionen des Calciumoxids mit dem vorhandenen Wasser auf mindestens 55 °C, sofern eine ausreichende Wärmedämmung des Reaktors vorhanden ist. Dabei muss der Anfangs-pH-Wert des Kalk-Klärschlamm-Gemisches mindestens 12,8 und die Verweilzeit bei mindestens 55 °C mindestens 3 Stunden betragen.
Verschiebung des pH-Wertes	Zugabe von Kalkhydrat bei der Schlammkonditionierung	Die Zugabe von Ca(OH) ₂ (z. B. als Kalkmilch) zu flüssigem Schlamm kann zu einem Anstieg des pH-Werts führen. Darüber hinaus dient dies ebenfalls der Reduzierung von Schadorganismen. Es müssen mindestens 0,2 kg Ca(OH) ₂ /kg TM zugegeben werden. Dabei muss der Anfangs-pH-Wert des Kalk-Klärschlamm-Gemisches mindestens 12,8 betragen. Das Gemisch ist vor der Verwertung mindestens drei Monate zu lagern.
Langfristige Aufbewahrungsverfahren, die eine Reduktion der Schadorganismen gewährleisten	Behandlung in Pflanzenbeeten	Schilf oder Flechtbinsen nehmen die im Flüssigschlamm enthaltene Organik auf und mineralisieren diese. Das Ergebnis ist ein erdartiges Substrat. Es enthält die aus dem Klärschlamm entnommenen organischen Bestandteile und die verrottete Wurzelmasse. Zur Belüftung des Untergrundes tragen die Schilfpflanzen bei. Zudem wird durch deren hohe Verdunstungsleistung die Klärschlamm-entwässerung begünstigt. Das Verfahren sollte in modular angelegten Behandlungsbeeten stattfinden, die zeitlich gestaffelt beschickt werden. So können Mindestverweilzeiten und beschickungslose Zeiten gewährleistet werden.
Trocknungsverfahren	Hochtemperatur-trocknung	Das Trocknungsmedium (Luft, Wasser etc.) wird auf eine Temperatur von über 100 °C gebracht und der Klärschlamm so getrocknet.

Quelle: [BMU]

Klärschlammintegration

Verfahren zur Klärschlammintegration haben das Ziel, die im Rohschlamm enthaltenen Strukturen und Mikroorganismen aufzuschließen und so einen beschleunigten und weitergehenden Abbau zu erreichen. Durch die Einwirkung äußerer Kräfte (physikalisch, chemisch, biologisch) werden die Schlammigenschaften verändert und die Inhaltsstoffe der Zellen den Abbauprozessen der Faulung besser zugänglich gemacht. Ziele der Klärschlammintegration sind außerdem gezielt Klärschlamm-inhaltsstoffe wie Phosphor ins Freiwasser zu überführen, eine höhere Biogasausbeute zu erreichen, die Schlammmasse zu verringern, die Bildung von Schaum oder Blähschlamm zu verhindern oder die Schlamm-entwässerung zu verbessern. Eingesetzt werden mechanische (z. B. Hochdruck, Ultraschall), chemische/biochemische (z. B. Säuren, Laugen, Oxidationsmittel, Enzyme) und thermische (Erhitzung) Verfahren oder Verfahrenskombinationen wie die Thermodruckhydrolyse.

Biologische Schlammstabilisierung

Die biologische Schlammstabilisierung hat zum Ziel, sich schnell zersetzende organische Stoffe zu reduzieren, da diese Geruchsprobleme verursachen können. Bei der biologischen Schlammstabilisierung wird meist zwischen anaeroben (Faulung), aeroben (Kompostierung) und wechselnd anaerob/aeroben (Vererdung) unterschieden. Diese laufen für gewöhnlich im psychro, meso- oder thermophilen Temperaturbereich ab.

Auf größeren Kläranlagen in Deutschland findet in der Regel eine anaerobe Schlammbehandlung in sogenannten Faultürmen statt. Mittlerweile wird auch die Prozessvariante Hochlastfaulung eingesetzt, die vor allem für kleinere Kläranlagen interessant ist. Das Ziel der Klärschlammfaulung ist die Stabilisierung des Klärschlammes, also die Verringerung der biologischen Aktivität und der Geruchsentwicklung. Wichtig ist auch, dass durch die Faulung unter anderem eine bessere Entwässerbarkeit des Klärschlammes erreicht werden kann. Ein weiterer Vorteil der anaeroben Behandlung besteht darin, dass aus einem Teil der organischen Bestandteile ein Gas produziert wird, das als Energieträger genutzt werden kann. Weitere Stabilisierungsverfahren sind die Kompostierung und die Vererdung von Klärschlamm.

Günstig für eine spätere thermische Behandlung ist der Umstand, dass mittels Faulung eine verbesserte nachgeschaltete Entwässerbarkeit erreicht wird, wodurch sich der Heizwert des Schlammes mit geringerem technischen Aufwand steigern lässt.

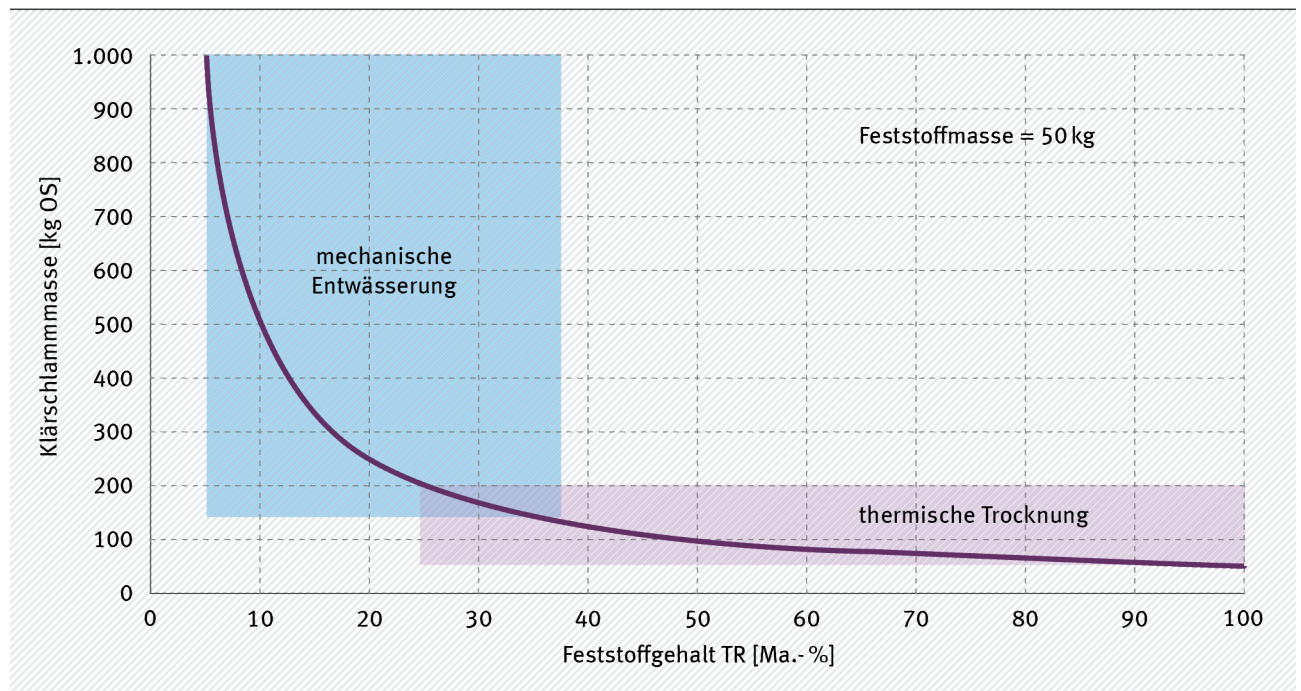
Entwässerung

Die mechanische Entwässerung dient der Mengenreduzierung des Schlammgemisches, indem sie den Wassergehalt verringert. Die Entwässerung ist insbesondere dann notwendig, wenn der Klärschlamm zur weiteren Behandlung oder Entsorgung transportiert werden muss. Einerseits wird die Menge des zu transportierenden Klärschlammes reduziert, andererseits lässt sich stichfester Klärschlamm wesentlich besser handhaben als flüssiger Schlamm. Gleichzeitig wird durch die Entwässerung der Heizwert erhöht, was die Wirtschaftlichkeit einer späteren thermischen Behandlung steigert.

Durch das mechanische Entwässern der Klärschlämme in Dekantern, Zentrifugen, Band- oder Kammerfilterpressen wird ein Feststoffgehalt, gemessen als Trockenrückstand (TR), zwischen 20 und 45 % erreicht. Der Erfolg einer mechanischen Entwässerung hängt wesentlich von den gewählten Verfahren, der Art und Beschaffenheit des Schlammes sowie einer eventuellen Konditionierung ab. Abbildung 4 zeigt die Massenreduktion durch Entwässerung und Trocknung.

In einer vorgeschalteten Schlammkonditionierung wird mit Hilfe von Additiven (Flockungs- und Flockungshilfsmitteln) die Entwässerbarkeit des Schlammes verbessert. Hierbei wird zwischen anorganischen Flockungsmitteln (z. B. Eisen- und Aluminiumsalze, Kalk, Kohle) und organischen Flockungsmitteln (organische Polymere) unterschieden. Eisen- und Aluminiumsalze werden häufig bereits im Abwasserbehandlungsprozess als Fällungsmittel zur Entfernung von Phosphat eingesetzt. Die anorganische Fällungsmittelzugabe erhöht den nicht verbrennbaren Anteil im entwässerten Schlamm (=Ascheanteil) maßgeblich. Biologische Fällungsverfahren weisen einen niedrigeren Ascheanteil als anorganische Verfahren auf. Deshalb werden vor einer thermischen Behandlung von Klärschlammern meist organische Konditionierungsmittel eingesetzt.

Abbildung 4

Massenreduktion durch Entwässerung und Trocknung


Quelle: [LEHRMANN 2013]

Klärschlamm Trocknung

Trockener Klärschlamm hat gegenüber Nassschlamm, der direkt aus dem Klärprozess kommt, einige Vorteile. Die folgenden Gründe sprechen für eine Entwässerung und anschließende Trocknung des Klärschlammes:

- ▶ Verringerung der Klärschlammmenge
- ▶ bessere Lager- und Transportfähigkeit
- ▶ bessere Förder- und Dosierbarkeit
- ▶ Hemmung mikrobiologischer Prozesse und hygienische Unbedenklichkeit
- ▶ Erhöhung des Heizwertes

Die mechanische Entwässerung ist nur ein erster Schritt innerhalb des Trocknungsprozesses. Um den Gehalt des Trockenrückstands im Klärschlamm auf mehr als 50 % zu erhöhen, kommen verschiedene Trocknungsverfahren zur Anwendung. Bei der Trocknung wird zwischen einer Teiltrocknung, bei der der getrocknete Schlamm bis ca. 85 % TR enthält und einer Volltrocknung mit bis ca. 95 % TR unterschieden.

Als teiltrocknet wird ein Klärschlamm bezeichnet, der die Leimphase durchlaufen hat, das heißt einen Gehalt von mehr als 50 bis 55 % TR aufweist.

Für eine spätere thermische Behandlung ist vor allem die Erhöhung des Heizwertes von Bedeutung. Häufig reicht der durch die mechanische Entwässerung erzielte Trockensubstanzgehalt für eine energieautarke Verbrennung nicht aus oder es ist aus technischen Gründen eine weitere Trocknung vor der Verbrennung nötig. Dabei gilt die Trocknung am Standort der Verbrennungsanlage (Abfallverbrennungsanlagen, Kraftwerken etc.), zum Beispiel mittels Abwärmenutzung als energetisch und wirtschaftlich sinnvoll. Prinzipiell ist die Trocknung von Klärschlamm ein sehr energieaufwändiger Prozess. Mit Hilfe von thermischer Energie muss das im Klärschlamm verbleibende Wasser verdampft werden. Der gewählte Trocknungsgrad hängt dabei von der späteren Verwendung des Klärschlammes ab.

Für eine selbstgängige Verbrennung (ohne Zusatzfeuerung) in sogenannten Klärschlammmonoverbrennungsanlagen (Verbrennungsanlagen zur reinen Klärschlammverbrennung) genügt in der Regel eine Entwässerung und Trocknung der Rohschlämme bis

zu einem Gehalt von 35 % TR. Faulschlämme müssen für eine energieautarke Verbrennung mindestens auf 45 bis 55 % TR getrocknet werden, da durch die Faulung eine geringere organische Restmasse zur Verbrennung verbleibt, was letztlich einen geringeren Heizwert verursacht. Abbildung 5 gibt den Zusammenhang zwischen infolge der Trocknung erreichbarem Heizwert und dem Wassergehalt der Klärschlämme wieder. In Abfallverbrennungsanlagen wird sowohl entwässertes als auch teilgetrockneter oder vollgetrockneter Klärschlamm mitverbrannt. Bei der Mitverbrennung in Kohlekraftwerken werden meist entwässerte Klärschlämme mit einem Feststoffgehalt zwischen 20 und 35 % TR eingesetzt. In den betreffenden Kraftwerken findet dann eine integrierte Trocknung des Klärschlammes in den Kohlemühlen statt. Es besteht in Kraftwerken auch die Möglichkeit direkt vollgetrocknete Schlämme einzusetzen. Der Einsatz von Klärschlämmen in Zementwerken erfordert über die Entwässerung hinaus prozessbedingt eine Volltrocknung.

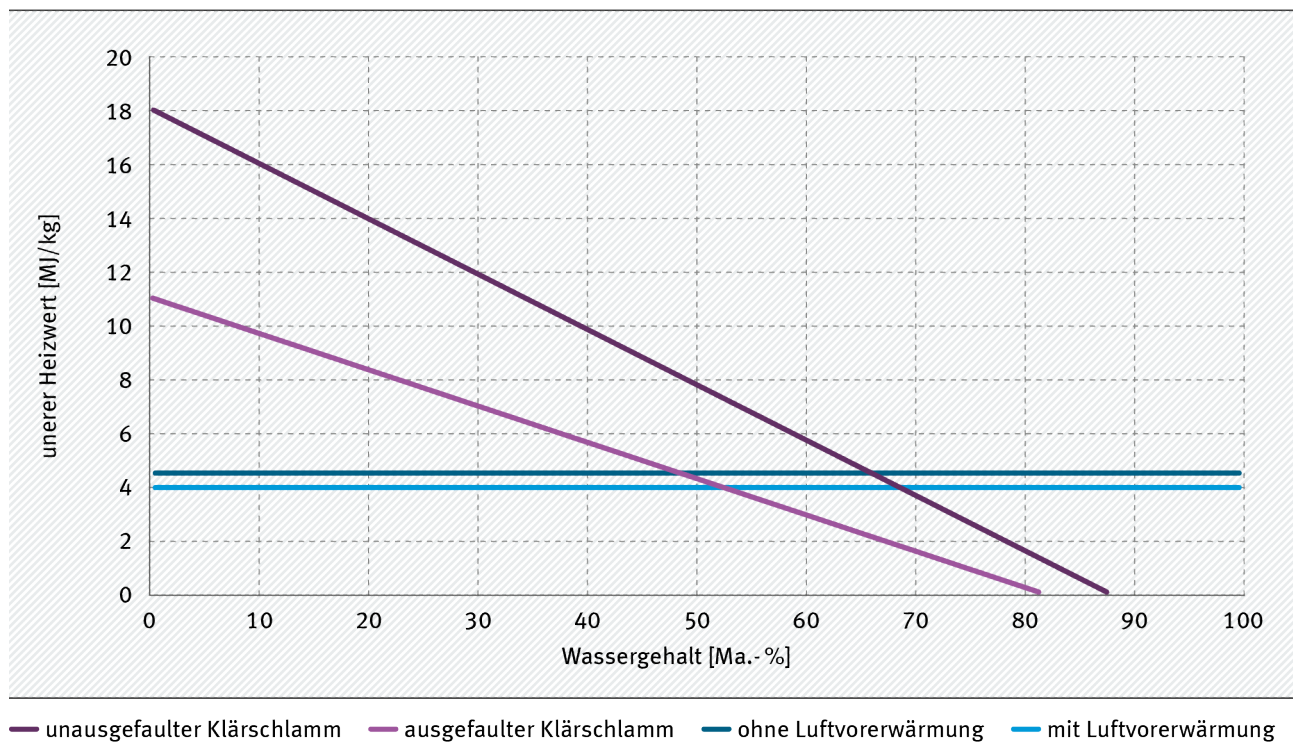
Klärschlamm verbrennt erst ab einem unteren Heizwert (Hu) von etwa 4.500 bis 5.000 kJ/kg energieautark. Dies entspricht in etwa dem Wassergehalt

von 50% eines ausgefaulten Schlammes mit 50% Ascheanteil. Nutzen Verbrennungsanlagen die heiße Abluft aus dem Kessel zur Vorerwärmung der Verbrennungsluft, so kann die selbstgängige Verbrennung schon ab 4.000 kJ/kg erreicht werden. Durch die Trocknung lässt sich der Heizwert des ausgefaulten Klärschlammes auf 10.000 bis 12.000 kJ/kg, je nach Aschegehalt, erhöhen. Der Heizwert von getrocknetem Klärschlamm liegt somit auf dem gleichen Niveau wie der von luftgetrocknetem Holz oder Braunkohle. Bei vollständig getrockneten nicht ausgefaulten Klärschlämmen kann dieser, aufgrund des höheren organischen Anteils, sogar 18.000 kJ/kg betragen. Zur Wärmeversorgung der Trockner eignet sich eine Reihe von Medien. Die Tabelle 6 gibt einen Überblick über die genutzten Wärmemedien und die dazu eingesetzten Trocknungssysteme bzw. Prozessbedingungen.

Die Auswahl des „richtigen“ Trocknungsverfahrens hängt von vielen Einflüssen und Randbedingungen ab. Neben der Einbindung in das gesamte Verfahren sind die zu erwartenden Eigenschaften des Endproduktes sowie wirtschaftliche und nicht zuletzt ökologische Gesichtspunkte bei der Auswahl zu beachten.

Abbildung 5

Zusammenhang zwischen erreichbarem Heizwert und des Wassergehaltes der Klärschlämme



Quelle: [EIGENE ERHEBUNG, LEHRMANN 2013]

Tab. 6

Eingesetzte Wärmemedien, Temperatur- und Druckbereiche sowie die dazugehörigen Trocknungsaggregate

Wärmemedium	Beispiele für Trocknungssystem	Druck (bar a)	Temperaturen (°C)
Rauchgas	Trommeltrockner	~ 1	≤ 850
BHKW-Abgas	Wirbelschichttrockner	~ 1	≤ 350
Luft	Trommeltrockner	~ 1	≤ 450
	Bandtrockner	~ 1	≤ 160
Dampf	Dünnschichttrockner	5–11	150–180
	Scheibentrockner	5–11	150–180
	Wirbelschichttrockner	≤ 20	≤ 200
Druckwasser	Dünnschichttrockner	5–11	150–180
	Scheibentrockner	5–11	150–180
	Wirbelschichttrockner	≤ 20	≤ 200
Thermalöl	Dünnschichttrockner	3–4	≤ 200
	Scheibentrockner	3–4	≤ 200
	Wirbelschichttrockner	≤ 20	≤ 250
Strahlung	Solartrockner	~ 1	< 50
	Infrarottrockner	~ 1	< 50

Quelle: [DWA 379]

Trocknungsverfahren können grundsätzlich in direkte und indirekte Verfahren sowie in strahlungsbasierte (Solartrocknung, Infrarottrocknung) unterschieden werden.

Bei den Direkttrocknern, auch Konvektionstrockner genannt, kommt der zu trocknende Klärschlamm unmittelbar mit dem Wärmeträger (in der Regel Dampf, Luft oder Rauchgas) in Berührung. Bei der Trocknung entstehen sogenannte Brüden, die ein Gemisch aus Wasserdampf, Luft und den aus dem Schlamm ausgetriebenen gasförmigen Bestandteilen darstellen. Die Brüden müssen im Anschluss einer Reinigung unterzogen werden. Um Geruchsbelästigungen und Gefährdungen der Anwohner zu vermeiden werden zuerst die Staubpartikel aus den Brüden herausgefiltert (Entstaubung), bevor diese mittels technischer oder biologischer Abgasreinigungsverfahren behandelt werden.

Bei indirekten Trocknersystemen, auch Kontaktstrockner genannt, wird die benötigte Wärme durch einen Dampferzeuger oder eine Thermalölanlage, bei dem ein synthetisches Öl als Wärmeträger fungiert, zur Verfügung gestellt. Der Wärmeübergang erfolgt bei Kontaktstrocknern zwischen einer heißen Trockneroberfläche und dem Schlamm. Wärmeträgermedium und Klärschlamm sind dabei getrennt. Der Vorteil dieser Technik ist, dass es nicht zu einer Vermischung von Wärmeträger und Brüden kommt. Dies erleichtert die spätere Reinigung der beiden Stoffströme. Kontaktstrockner erreichen in der Regel Feststoffgehalte von 65 bis 80 % TR. Das durch die Trocknung verdampfte Wasser ist nur mit Leckluft und mit geringen Mengen flüchtiger Gase verunreinigt. Der Wasserdampf kann aus den Brüden nahezu vollständig kondensiert werden. Die verbleibenden Gase können in der Kesselfeuerung desodoriert werden.

In den letzten Jahren haben sich solare Trocknungsverfahren verbreitet. Sie nutzen die Sonnenenergie für die Klärschlamm-trocknung. Der Schlamm wird in einem verglasten Gebäude, ähnlich einem Gewächshaus, von der Sonne erwärmt und getrocknet. Damit die Verdunstung des Wasser und somit die Trocknung des Klärschlamm optimal ablaufen können, muss der Klärschlamm gut belüftet und mehrmals gewendet werden [FELBER/FISCHER]. Zur Unterstützung dieses Verfahrens kann – zum Beispiel mittels Fußbodenheizung oder Radiatoren – die Abwärme aus Kraftwerken oder Abfallverbrennungsanlagen genutzt werden. [LEHRMANN 2010].

In Deutschland sind aktuell insgesamt 203 Trocknungsanlagen an 175 Standorten für kommunale Klärschlamm installiert. Abbildung 6 gibt einen Überblick über die eingesetzten Trocknungsverfahren. Gemessen an der Anzahl, stellen die Solartrockner mit und ohne Abwärmenutzung mit knapp

44 % den größten Anteil aller installierten Trocknungsanlagen. Allerdings erbringen diese Anlagen kumuliert lediglich 9 % des in Deutschland getrockneten Klärschlamm. Weitere, sehr häufig genutzte Trocknungsverfahren sind Band-, Dünnschicht- und Scheibentrockner. Die Klärschlamm-trocknung nach dem Wirbelschichtprinzip wird wie auch die Schau-feltrocknung an nur einem Standort betrieben, wobei mit 16.000 bzw. 17.500 t/TS im Jahr jedoch sehr hohe Durchsätze erreicht werden können.

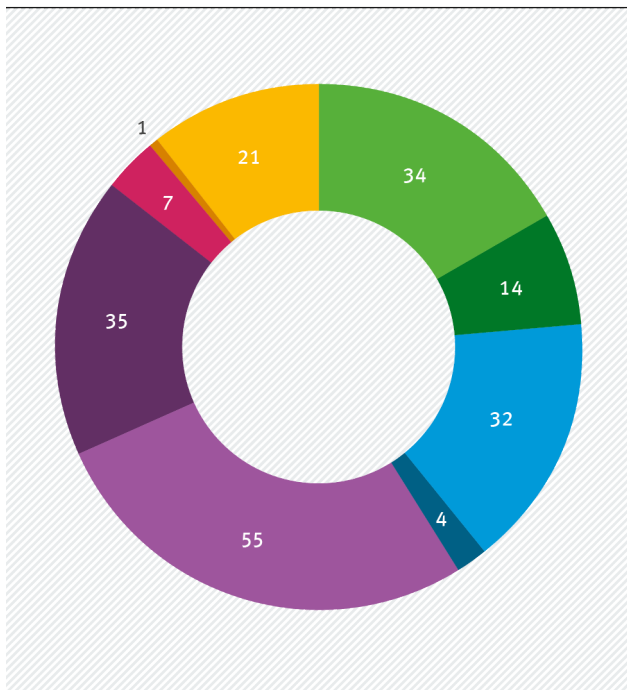
Die Tabelle 7 zeigt eine Aufstellung der installierten Trocknungsanlagen sowie die aufsummierten Durchsätze nach angewandter Trocknungstechnologie. 2004 waren in Deutschland insgesamt 74 Trocknungsanlagen im Betrieb, in denen in Summe fast 360.000 t Klärschlamm-trockensubstanz (TS) behandelt wurde. Bis 2012 verdoppelte sich diese Anzahl auf 143, wobei der Gesamtdurchsatz nicht in gleichem Maße anstieg, was auf die verstärkte Installation von Solartrocknern zurückzuführen ist. Seit 2012 hat sich die Anzahl der Solartrockner im Wesentlichen nur durch solche Anlagen erhöht, die Abwärme (insbesondere von Kraftwerken) zur Unterstützung des solaren Trocknungsprozesses einsetzen, was vergleichsweise höhere Durchsätze bei gleichem Flächenbedarf ermöglicht. In den folgenden Jahren bis 2018 nahm vor allem die Trocknungskapazität der Band-trocknung zu, welche aktuell fast ein Viertel an der Gesamtkapazität von ca. 560.000 t TS pro Jahr (a) ausmachen. Dagegen verringerten sich die Anlagenanzahl und die Kapazität der Trommel- und Wirbelschicht-trockner vorrangig aus betriebswirtschaftlichen Gründen in letzten Jahren deutlich.

Neben dem genutzten Trocknungsverfahren unterscheiden sich die Trocknungsanlagen auch in ihren eingesetzten Leistungsbereichen sowie im mittleren Durchsatz, was in Abbildung 7 dargestellt wird.

Eine detaillierte Übersicht mit technischen Details aller Trocknungsanlagen in Deutschland ist der Tabelle 25 im Anhang III zu entnehmen.

Abbildung 6

Anzahl der Klärschlamm-trockner aufgeteilt nach Trocknerart



- Band-trockner
- Dünnschicht-trockner
- Scheibentrockner
- Schnecken-trockner
- Solartrockner
- Solartrockner mit Abwärme
- Trommel-trockner
- Wirbelschicht-trockner
- Sonstige

Quelle: [EIGENE ERHEBUNG 2018]

Tab. 7

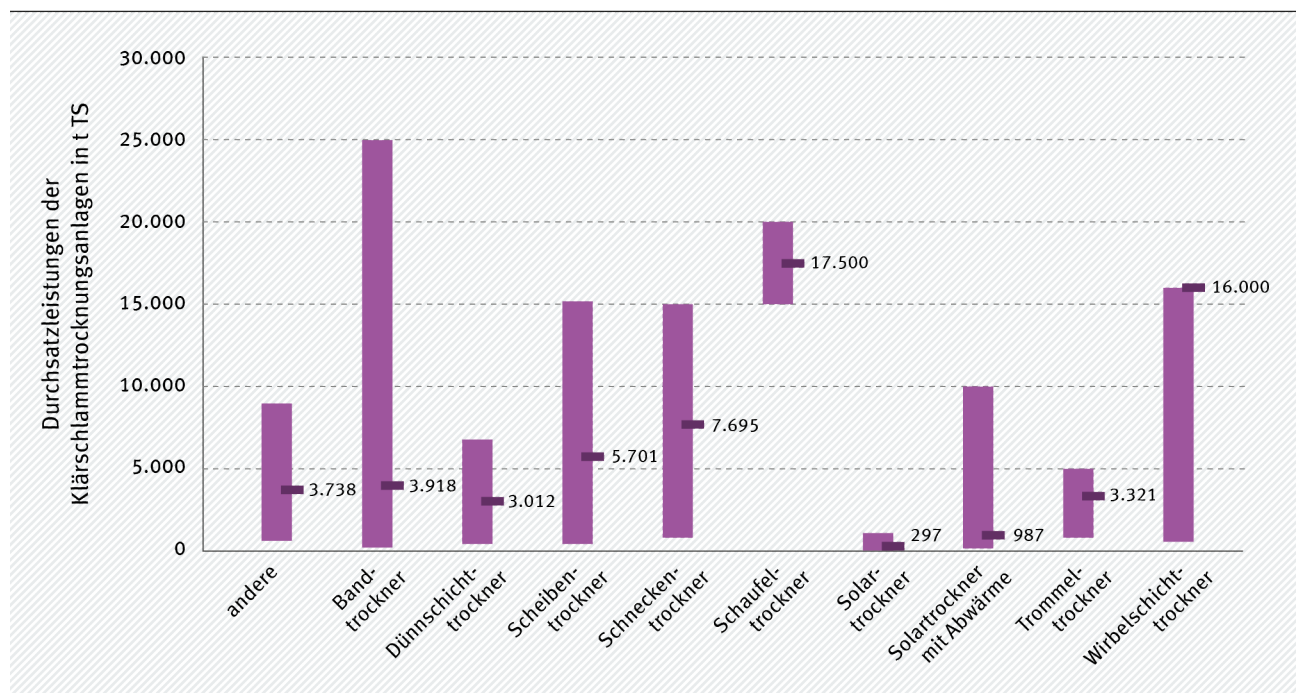
Entwicklung der installierten Trocknungsanlagen und Durchsatzmengen

	2004		2012		2018	
	Anzahl [-]	Durchsatz [t TS/a]	Anzahl [-]	Durchsatz [t TS/a]	Anzahl [-]	Durchsatz [t TS/a]
Bandrockner	16	29.086	20	45.001	34	133.206
Dünnschichtrockner	7	38.092	7	40.982	14	42.162
Scheibentrockner	14	183.087	14	179.587	32	182.420
Schneckenrockner	–	–	1	30.000	4	30.780
Solarrockner	10	9.440	55	19.521	55	16.333
Solarrockner mit Abwärme	–	–	20	23.178	35	34.554
Trommelrockner	18	83.460	16	65.400	7	23.250
Wirbelschichtrockner	6	13.590	6	22.500	1	16.000
Sonstige	3	300	4	25.500	21	78.500
Gesamt	74	357.055	143	451.669	203	557.205

Quelle: [EIGENE ERHEBUNG 2018]

Abbildung 7

Leistungsbereiche der Trocknerarten und mittlerer Klärschlamm durchsatz, Durchsatz [t TM/a]



Quelle: [EIGENE ERHEBUNG 2018]

04

Thermische Klärschlamm- behandlung

- ▶ Monoklärschlammverbrennung
- ▶ Mitverbrennung von Klärschlamm

Der Begriff der „thermischen Behandlung“ von Klärschlamm umfasst allgemein die Verbrennung in Monoverbrennungsanlagen (einschließlich Vergasungsanlagen) sowie die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken, Zementwerken und Abfallverbrennungsanlagen. Darüber hinaus werden seit einigen Jahren alternative thermische Behandlungsmöglichkeiten (z. B. der Pyrolyse) erprobt.

Klärschlamm- monoverbrennung

Monoklärschlammverbrennungsanlagen werden bei Temperaturen zwischen 850 und 950 °C betrieben. Temperaturen unter 850 °C können zu Geruchsemissionen führen, bei Temperaturen über 950 °C besteht die Gefahr der Versinterung der Asche. Das Temperaturniveau, das sich bei der Verbrennung einstellt, ist abhängig vom Energieinhalt und der Menge des eingebrachten Klärschlammes sowie von der Verbren-

nungsluftmenge. Nach der 17. Bundes-Immissionschutzverordnung (17. BImSchV, siehe Kapitel 1) werden eine Nachverbrennung bei mindestens 850 °C sowie eine ausreichende Verweilzeit der Abgase in der Nachbrennkammer von mindestens 2 Sekunden gefordert, um einen vollständigen Ausbrand der Rauchgase zu erreichen. Derzeit werden in Deutschland etwa 22 Klärschlammmonoverbrennungsanlagen und eine Klärschlammmonovergasungsanlage mit einer Gesamtkapazität von rund 670.000 t Klärschlamm TS pro Jahr und 7 betriebliche Klärschlammmonoverbrennungsanlagen betrieben, die zusammen 980.000 t TS im Jahr verbrennen können [SIX; Krüger et al.]. Die Auslastung der genehmigten Anlagenkapazitäten reicht dabei von knapp 75 % für kommunalen Klärschlamm bis zu gut 80 % bei betrieblichen Klärschlamm. Je nach Anlage kann Roh- oder Faulschlamm eingesetzt werden. Dieser kann dann entwässert, teilgetrocknet oder getrocknet aufgegeben werden. Detailliertere Informationen können der Tabelle 22 entnommen werden.



Feuerungssysteme

Bei der Klärschlammmonoverbrennung werden hauptsächlich die folgenden Feuerungssysteme eingesetzt:

- ▶ Wirbelschichtofen
- ▶ Etagenofen
- ▶ Etagenwirbelofen
- ▶ Rostfeuerung

Von den 23 im kommunalen Bereich installierten großtechnischen Anlagen zur thermischen Klärschlammbehandlung (inkl. Vergasung) stellt die stationäre Wirbelschichttechnologie mit 19 Anlagen den dominierenden Anteil. Alternative Konversionstechnologien (Rostfeuerung, Etagenwirbler bzw. -ofen) haben bisher nicht in der Breite Anwendung gefunden, sind aber bis auf Rostfeuerungen seit einigen Jahrzehnten im Betrieb.

Tabelle 8 fasst die Besonderheiten der einzelnen Verbrennungsöfen zusammen.

Die vier genannten Feuerungssysteme arbeiten nach unterschiedlichen Verfahrenstechniken. Dabei haben der Ofenaufbau, die Feuerungsführung, die Betriebsweise der Verbrennungsanlage, die sich daraus ergebenden nachzuschaltenden Reinigungseinrichtungen sowie der Transport der verschiedenen Stoffströme erheblichen Einfluss auf die Quantität und Qualität der entstehenden Emissionen. In den letzten Jahren hat sich die stationäre Wirbelschicht als für die Klärschlammverbrennung geeignetste Feuerungsart durchgesetzt. Gegenwärtige Überlegungen zu Anlagenneueinstellungen zeigen den Trend auf, die bewährten Monoverbrennungskonzepte auf die Erfordernisse des dezentralen Sektors herunter zu skalieren.

Tab. 8

Vergleich der Feuerungssysteme

	Wirbelschichtofen	Etagenofen	Etagenwirbler	Rostfeuerung
Besonderheiten	Keine mechanisch-beweglichen Teile und geringer Verschleiß, Geeignet für alle Trocknungszustände	Keine separate Vortrocknung erforderlich, aufwändiger Ofenaufbau mit beweglichen Teilen, gekühlte Hohlwelle	Keine separate Vortrocknung erforderlich, bewegliche Hohlwelle, geringes Wirbelschichtvolumen	Mechanische bewegte Teile im Feuerraum, hoher Durchsatz
Betriebsverhalten	Schnelles An- u. Abfahren durch kurze Aufheiz- u. Abkühlzeiten, intermittierender Betrieb möglich	Lange Aufheizzeiten; kontinuierlicher Betrieb notwendig	Mittlere Aufheiz- u. Abkühlzeiten	Lange Aufheizzeiten; unempfindlich ggü. Teillastbetrieb
Verbrennung	Geringer Luftüberschuss erforderlich, vollständiger Ausbrand erst oberhalb der Wirbelschicht	Ausbrand schwieriger steuerbar, unempfindlich gegen Schwankungen bei Aufgabemengen u. Grobstoffen	Geringer Luftüberschuss erforderlich, gute Ausbrandsteuerung, Verbrennung ist weitgehend innerhalb der Wirbelschicht abgeschlossen, unempfindlich gegenüber Qualitätsschwankungen des Schlammes als Wirbelschichtöfen	Höherer Luftüberschuss erforderlich, Ausbrand schwieriger steuerbar, empfindlich gegenüber heizwertreichen Brennstoffen
Aschegehalt im Abgas	Hoch	Gering	Hoch	Gering
Ascheaustrag	Über Abgasstrom und Sandabzug	Direkt aus der untersten Etage	Über Abgasstrom und Sandabzug	Über Abgasstrom und Rostabzug
Reststoffe	Asche, Wirbelbettmaterial	Asche	Asche, Wirbelbettmaterial	Asche, Rostasche

Emissionen aus Klärschlammverbrennungsanlagen

Die Verbrennung von Klärschlamm in Monoverbrennungsanlagen und Mitverbrennungsanlagen unterliegt der 17. BImSchV. Darin ist eine Reihe von Emissionsgrenzwerten enthalten, die die Emissionen nach dem Stand der Technik begrenzen. Zur Minderung der Emissionen und damit auch zur Einhaltung der Grenzwerte haben alle Klärschlammmonoverbrennungsanlagen aufwändige Abgasreinigungssysteme installiert.

In der Verordnung sind zum Beispiel die Emissionen von Staub, Stickoxiden und Quecksilber geregelt. Staub entsteht bei jedem Verbrennungsprozess und bei jeder Art von Verbrennungsanlage. Alle Anlagen sind mit einem oder mehreren filternden Staubabscheider ausgerüstet, wodurch die Staubemissionen effektiv gemindert werden. Der durchschnittliche Staubgehalt im gereinigten Abgas beträgt nur zwischen 0,2 und 2,5 mg/m³. Der Emissionsgrenzwert der geltenden Verordnung liegt bei 5 mg/m³ (Tagesmittelwert).

Die Bildung von Stickoxiden (NO_x) in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen ist im Wesentlichen auf zwei Quellen zurückzuführen. Zum einen enthält der Klärschlamm selbst Stickstoffverbindungen, die durch die Oxidation NO_x bilden können. Zum anderen erfolgt der Eintrag über die Verbrennungsluft in Form von Sauerstoff und Stickstoff, welche bei hohen Temperaturen miteinander zu NO_x reagieren (Luftsynthese). Der Mittelwert der Emissionen liegt bei etwa 80 mg/m³, wobei aber auch Werte bis 180 mg/m³ gemessen werden. Der Grenzwert für Stickoxide liegt für Anlagen im Leistungsbereich bis 50 Megawatt (MW) Feuerungswärmeleistung bei 200 mg/m³ (Tagesmittelwert).

Distickstoffmonoxid (N₂O) – besser bekannt unter der Bezeichnung Lachgas – ist ein relevantes Treibhausgas, was eine rund 300fach stärkere Klimawirkung als CO₂ aufweist. Bei der thermischen Behandlung von Stickstoffreichen Reststoffen – wie Klärschlamm – kann es bei ungünstigen Prozessbedingungen (z. B. hoher Luftüberschuss und bei zu niedrigen Verbrennungstemperaturen in Wirbelschichtfeuerungen) entstehen.

Neben den beiden genannten Luftschadstoffen ist insbesondere auch Quecksilber von besonderer Umweltrelevanz. Die DWA ermittelte für den Zeitraum von 2015 bis 2017 die durchschnittlichen Quecksilberkonzentrationen in kommunalen und betrieblichen Klärschlamm sowie im Abgas von Monoverbrennungs-

anlagen. Der Auswertung lagen Messdaten mehrerer Klärschlammverbrennungsanlagen zugrunde, die in Summe 40 % der genutzten Gesamtverbrennungskapazität repräsentieren. Bezogen auf den Input werden danach durch die Abgasreinigungseinrichtungen der Monoverbrennungsanlagen etwa 98,5 % des Quecksilbers zurückgehalten [SIX]. Der Hg-Grenzwert der 17. BImSchV (Tagesmittelwert 0,03 mg Hg/ m³) wird im Mittel um etwa das Zehnfache unterschritten. Mit dieser Datengrundlage ergibt sich für das Jahr 2016 eine Gesamtquecksilberfracht von etwa 15 kg aus allen Klärschlammmonoverbrennungsanlagen in Deutschland. Im Vergleich zu deutschen Kohlekraftwerken, die jährlich mehr als 5 Tonnen Quecksilber emittieren, sind die Quecksilberemissionen aus der Klärschlammverbrennung nahezu vernachlässigbar.

Sonstige Verfahren

Das entwickelte SynGas-Verfahren ist ein Klärschlammvergasungsverfahren, welches vor einigen Jahren an zwei Standorten (Balingen und Mannheim) auf Basis des Wirbelschichtprinzips im Probebetrieb realisiert wurde. Dabei werden vollgetrocknete Klärschlämme in der ersten Prozessstufe bei 850 – 880 °C zu einem brennbaren Schwachgas, was neben Stickstoff hauptsächlich aus Wasserstoff, Methan, Kohlenstoffmonoxid bzw. -dioxid und langkettigen Kohlenwasserstoffen (Teere) besteht, umgesetzt. In der zweiten Prozessstufe werden durch partielle Oxidation die Kohlenwasserstoffe zu Methan, Kohlenstoffmonoxid und Wasserstoff zerlegt. Das dabei gewonnene Synthesegas wird anschließend gereinigt in einem Blockheizkraftwerk verbrannt und dient damit der gekoppelten Erzeugung von Strom und Wärme. Aktuell ist die Errichtung einer weiteren Vergasungsanlage in Koblenz mit einem Jahresdurchsatz von 4.000 t TS geplant.

Entwicklungen alternativer Klärschlammbehandlungsverfahren

Als weitere Alternativen zu den thermischen Behandlungsverfahren sehen Experten sogenannte chemisch-physikalische Verfahren, wie beispielsweise die Nassoxidation, Hydrolyse, die Hydrothermale Carbo-nisierung (HTC) oder die Hydrothermaloxidation (super-critical water oxidation) an. Derzeit werden auch eine Reihe von weiteren Klärschlammvergasungs- und -pyrolyseverfahren entwickelt. Als Beispiele können dafür die Verfahren Pyreg, Pyrobuster oder das

Klärschlamm-Reforming-Verfahren genannt werden. Die hier aufgeführten alternativen Behandlungsverfahren befinden sich zumeist aber noch im Entwicklungsstadium oder wurden bisher nur in sehr geringer

Zahl großtechnisch getestet. Teilweise wurden auch Entwicklungsarbeiten alternativer thermo-chemischer Konversionsverfahren wieder eingestellt.

Mitverbrennung von Klärschlamm

Neben der thermischen Behandlung in Klärschlammmonoverbrennungsanlagen kann Klärschlamm auch in bestehenden Kraftwerken mitverbrannt werden. Diese Mitverbrennung von Klärschlamm findet vor allem in Kohlekraftwerken, Abfallverbrennungsanlagen und Zementwerken statt. Für die Zementindustrie liegt ein Vorteil gegenüber der Klärschlammmonoverbrennung darin, dass dadurch Brennstoffe und Rohstoffe eingespart werden können. Weist der Klärschlamm zumindest einen teilgetrockneten Zustand auf, so trägt die Mitverbrennung zusätzlich auch zur Einsparung von (fossilen) Brennstoffen bei.



Mitverbrennung in Kohlekraftwerken

In den letzten Jahren hat die Mitverbrennung von Klärschlamm in Kraftwerken einen immer größeren Anteil an der Klärschlamm Entsorgung eingenommen. Derzeit werden 401.000 t TM/a an Mitverbrennungskapazität für kommunalen Klärschlamm genutzt. Sowohl in Braunkohle als auch in Steinkohlekraftwerken kann Klärschlamm mitverbrannt werden. Als Feuerungsart sind hauptsächlich Staub- oder zirkulierende Wirbelschichtfeuerungen in Betrieb.

Verbrannt wird im Allgemeinen nur stabilisierter (d.h. ausgefalter) Klärschlamm. Der Einsatz von Rohschlamm würde zu große Schwierigkeiten bei der Handhabung und bei der Lagerung mit sich bringen und ist aufgrund seines hohen Wassergehalts, vor allem durch seine schlechte Entwässerbarkeit sowie durch Gasbildung und Geruchsentwicklung nicht geeignet. Technisch möglich ist sowohl die Verbrennung von getrocknetem Klärschlamm als auch die von nur entwässertem Klärschlamm. In den meisten mitverbrennenden Kraftwerken wird derzeit entwässertem Klärschlamm mit einem Trockensubstanzgehalt von etwa 25 bis 35 % TR verbrannt. In einigen Kraftwerken wird ausschließlich vollgetrockneter Klärschlamm eingesetzt, in anderen wird dieser mit entwässertem Klärschlamm rückvermischt dem Verbrennungsprozess zugegeben.

Beim Einsatz von entwässertem Klärschlamm findet vor der Verbrennung im Allgemeinen eine integrierte Trocknung des Klärschlammes statt. Bei Kraftwerken mit Staubfeuerung wird der Klärschlamm in der Regel über die Kohlemühle in den Prozess eingebracht und dort gemeinsam mit der Kohle getrocknet und zerkleinert. Häufig bildet die Trocknungskapazität der Kohlemühlen den limitierenden Faktor, aufgrund dessen der Einsatz von entwässertem Klärschlamm auf einen niedrigen Prozentsatz begrenzt bleibt. Dies gilt vor allem für Steinkohlekraftwerke, bei denen wegen des geringen Wassergehaltes der Steinkohle nur begrenzte Trocknungsleistungen zur Verfügung stehen. Tabelle 9 gibt einen Überblick über die Mitverbrennung in Kohlekraftwerken.

Klärschlamm hat im Vergleich zu Kohle einen relativ hohen Anteil an mineralischen Bestandteilen von etwa 40 bis 50 %. Entsprechend hoch ist der Aschegehalt, der nach der Verbrennung abgeschieden werden muss, und entsprechend niedrig ist der auf die gesamte Trockenmasse bezogene Heizwert. Der Heizwert von Klärschlamm liegt im vollgetrockneten Zustand bei 9 bis 12 MJ/kg. Braunkohle hat im Anlieferungszustand, also mit etwa 50 % Wassergehalt, einen vergleichbaren Heizwert. Steinkohle wird mit einem Wassergehalt von 7 bis 11 % gewonnen und hat in diesem Zustand einen Heizwert von 27 bis 30 MJ/kg.

Im Anlieferungszustand – mit einem Wassergehalt von 65 bis 75 % – hat entwässertem Klärschlamm keinen positiven Heizwert. Wird der Klärschlamm mit Abwärme aus dem Kohlekraftwerk im Niedertemperaturbereich getrocknet, kann Klärschlamm mit Energiegewinn verbrannt werden. Abwärme, die andernfalls über den Kühlturm abgegeben würde, kann auch zur Trocknung von Klärschlamm genutzt werden, um bei dessen Verbrennung hochwertige Energie in Form von Strom und Dampf zu gewinnen. Im Kraftwerk kann dadurch zu einem geringen Prozentsatz der fossile Energieträger Kohle durch Klärschlamm substituiert werden, weshalb hier auch von einer energetischen Verwertung des Klärschlammes gesprochen wird.

Tab. 9

Mitverbrennung in Kohlekraftwerken

	Brennstoffeigenschaften	Feuerungsart	Klärschlammmitverbrennung
Steinkohlekraftwerk	Steinkohle, Wassergehalt: 7–11 % Heizwert: 27–30 MJ/kg	Staubfeuerung, Schmelzkammerzyklon, zirkulierende Wirbelschicht	Einsatz von entwässertem Klärschlamm ist begrenzt durch die geringe Trocknerleistung der Kohlemühle
Braunkohlekraftwerk	Braunkohle, Wassergehalt: 46–60 %, Heizwert: 8,5–12,5 MJ/kg	Staubfeuerung, zirkulierende Wirbelschicht	Einsatz ist durch den Schadstoffgehalt (Schwermetalle) des Klärschlammes begrenzt

Wie bereits dargestellt, ist Klärschlamm eine Senke für eine Reihe von Schadstoffen. Werden die Klärschlämme in Kohlekraftwerken mitverbrannt, macht sich der zusätzliche Eintrag von Schwermetallen – insbesondere von leicht flüchtigen Substanzen wie Quecksilber – bei den Emissionswerten bemerkbar. Dies ist unter anderem ein Grund dafür, dass die mitverbrannte Klärschlammmenge in Kraftwerken auf einen geringen Prozentsatz beschränkt bleibt. Beim Einsatz größerer Klärschlammengen müssen zusätzliche Abgasreinigungseinrichtungen nachgerüstet werden. Unabhängig von der eingesetzten Klärschlammmenge ist die bei der Klärschlammmitverbrennung in Kohlekraftwerken die 17. BImSchV einzuhalten. Ein weiterer Grund für die Begrenzung der mitverbrannten Klärschlammmenge ist die Qualität der Flugasche, die meist als Baustoff verwertet wird und die entsprechenden Baustoffnormen einhalten muss.

In den meisten Kohlekraftwerken hat sich ein Klärschlammanteil von bis zu 5 % der Brennstoffmasse bewährt. Die Erfahrungen haben gezeigt, dass die Mitverbrennung dieser Menge ohne nennenswerte Probleme zu bewältigen ist. Die aktuelle Auslastung der genehmigten Mitverbrennungskapazität in Kohlekraftwerken liegt bei knapp 50 %.

Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen

Kommunale Klärschlämme werden in unterschiedlichen Trocknungsgraden in einer Reihe von Abfallverbrennungsanlagen mit entsorgt, deren verfahrenstechnisches Prinzip zumeist auf der Rostfeuerungstechnologie beruht. Der Beimischungsrate sollte dabei 20 % nicht überschreiten und der feuchte Schlamm sollte zur Vermeidung des Verklumpens

mit dem übrigen Material gut vermischt werden, was häufig durch sogenannte Aufstreumaschinen im Müllbunker oder durch Schleudereinrichtungen zur Beschickung des Feuerraums erreicht wird. Wird getrockneter Klärschlamm mitverbrannt, besteht die Gefahr, dass der Schlamm durch den Rost fällt, ohne ausreichend ausgebrannt zu sein. Bei der Mitverbrennung in Abfallverbrennungsanlagen ist zu beachten, dass der Klärschlamm den Staubgehalt des Abgases maßgeblich beeinflusst und daher die vorhandenen Rauchgasreinigungseinrichtungen für die erhöhte erforderliche Abscheideleistung ausgelegt sein müssen.

Die in den Abfallverbrennungsanlagen entsorgte Klärschlammmenge lag in den letzten Jahren auf einem annähernd gleichbleibenden Niveau und betrug im Jahr 2016 ca. 42.300 t TM.

Mitverbrennung in Zementwerken

Die Zementherstellung ist ein sehr energieintensiver Prozess, in dem schon seit Jahrzehnten Ersatzbrennstoffe aus Abfällen eingesetzt werden. Getrockneter Klärschlamm kann hier fossile Brennstoffe ersetzen. Darüber hinaus kann der mineralische Anteil im Klärschlamm die bei der Zementherstellung benötigten mineralischen Rohstoffe wie Sand oder Eisenerz substituieren.

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken ist damit in doppelter Hinsicht vorteilhaft. Zum einen werden wertvolle Roh- und Brennstoffe eingespart und zum anderen trägt die Mitverbrennung des als weitgehend klimaneutral angesehenen Klärschlammes auch zur CO₂-Reduzierung bei. Neben getrocknetem Klärschlamm wird auch in geringem Umfang mechanisch entwässerter Klärschlamm eingesetzt. In diesem

Fall ist nur ein sehr geringer Beitrag zur Deckung des Energiebedarfs zu erwarten, vielmehr steht die Substitution von Rohstoffen im Vordergrund.

Mit Novellierung der 17. BImSchV vom 02.05.2013 gelten in der Regel die Schwermetallgrenzwerte der Abfallverbrennung auch für die Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken. Zur Begrenzung des Eintrags von Schwermetallen sind Inputbegrenzungen auch für den Schwermetallgehalt im Klärschlamm von besonderer Bedeutung.

Tabelle 10 zeigt die Menge an in Zementwerken verbrannten Klärschlamm für die Jahre 2003 bis 2016.

Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Zementwerken ist seit dem Jahr 2003 in den Umweltdaten des Vereins Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) dokumentiert. Insbesondere zwischen den Jahren 2004 und 2006 und den Jahren 2013 und 2016 waren dabei jeweils deutliche Steigerungen auf nunmehr 463.000 t Klärschlamm (bei einem mittleren Wassergehalt von 27 Gew.-%) im Jahr 2016 zu beobachten (entspricht ca. 125.000 t TM/a). Ein wesentlicher Grund für den ersten sprunghaften Anstieg ist in dem Deponierungsverbot für alle unbehandelten Abfälle durch die damalige Technische Anleitung Siedlungsabfall (TASi) zu sehen. Treiber für den zweiten stärkeren Mengenzuwachs zwischen 2013 und 2016 sind insbesondere Aktivitäten im Bereich Klima- und Ressourcenschutz.

Den größten Anteil bei der Mitverbrennung von kommunalen Klärschlämmen haben derzeit die Kohlekraftwerke mit etwa 401.000 t TM/a, was ca. 23% des Gesamtaufkommens ausmacht. Der Anteil der in Zementwerken mitverbrannten Klärschlammmenge liegt bei etwa 7%, der von Abfallverbrennungsanlagen bei etwa 3%.



Vor- und Nachteile der Mitverbrennung von Klärschlamm

Durch die Mitverbrennung von teil- oder vollgetrockneten Klärschlämmen können fossile Brennstoffe und somit auch Kosten eingespart werden. Die Einsparung von fossilen Brennstoffen, die aus ihrer Substitution durch den Klärschlamm resultiert, trägt zu einer CO₂-Reduzierung bei, da die brennbaren Bestandteile des Klärschlamm weitgehend biogenen Ursprungs sind. Die Zementindustrie nutzt die Klärschlammmasche gleichzeitig als Rohstoffersatz, was eine weitere Kosteneinsparung ermöglicht und zur Ressourcenschonung beiträgt.

Tab. 10

Verbrannte Klärschlammmenge in Zementwerken von 2004 bis 2016

Jahr	Verbrauch [kt/a]	Heizwert [MJ/kg]
2004	48	4
2005	157	3
2006	238	4
2007	254	4
2008	267	4
2009	263	4
2010	276	4
2011	304	4
2012	310	4
2013	316	3
2014	348	3
2015	382	3
2016	463	3

Quelle: [VDZ A-M]

Ein Nachteil der Mitverbrennung ist allerdings, dass der im Klärschlamm enthaltene Phosphor in der Regel aus dem Kreislauf entfernt wird, denn entweder ist der Phosphor fest im Zement eingebunden oder er ist stark verdünnt in der Schlacke und in anderen Verbrennungsrückständen verteilt. Künftig wird entsprechend der Vorgaben der AbfKlärV zur verpflichtenden Phosphorrückgewinnung für Kläranlagen > 50.0000 EW eine Mitverbrennung von phosphorreichen Klärschlämmen weiter eingeschränkt werden. Für die Klärschlämme, deren Phosphor bereits zurückgewonnen wurde bzw. die nur einen geringen Phosphoranteil (bspw. betriebliche Klärschlämme) aufweisen, wird dagegen die Mitverbrennung in Kohlekraft- und Zementwerken oder Abfallverbrennungsanlagen weiterhin einen geeigneten Entsorgungspfad bieten.

Auf die Rückgewinnung von Phosphor und die daraus resultierende Bedeutung für die zukünftige Klärschlamm Entsorgung wird im Kapitel 6 „Phosphorrückgewinnung“ detaillierter eingegangen.

Eine ausführliche Zusammenstellung aller in Deutschland befindlichen Anlagen, die Klärschlamm verbrennen oder mitverbrennen, befindet sich in Anhang I.

05

Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm

- ▶ Nährstoffe im Klärschlamm
- ▶ Schadstoffe im Klärschlamm
- ▶ Vor- und Nachteile der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung

Die Ausbringung von Klärschlamm als Düngemittel hat in der Landwirtschaft eine lange Tradition. Durch die bodenbezogene Nutzung werden Nährstoffe wie Phosphor und Stickstoff im Kreislauf geführt und können einen Teil des Nährstoffbedarfes landwirtschaftlicher Nutzpflanzen decken. Klärschlamm kann darüber hinaus die Humusbilanz verbessern. Die bodenbezogene Klärschlammverwertung wird durch das Düngerecht und ergänzend durch die Klärschlammverordnung geregelt. Damit gehört Klärschlamm zu den am häufigsten und regelmäßig kontrollierten Sekundärrohstoffdüngern. Gleichzeitig stellt Klärschlamm jedoch auch eine Senke für unerwünschte Abwasserinhaltsstoffe aus Haushalten, Gewerbe und diffusen Quellen dar, über deren Umweltrelevanz und -wirkung teilweise wenig bekannt ist. Eine damit einhergehende mögliche Schadstoffbelastung von Boden, Pflanze oder Grund- und Oberflächenwasser ist nur schwer einschätzbar. Aus diesem Grund ist die Nutzung des Klärschlammes als Düngemittel schon längere Zeit umstritten. Durch die neuen gesetzlichen

Regelungen (Aktualisierung des Düngerechts, Novellierung der Klärschlammverordnung, in Kraft seit 03.10.2017) wird die bodenbezogene Klärschlammverwertung immer stärker eingeschränkt. Die Nutzung von Klärschlämmen aus großen Kläranlagen (über 50.000 EW) wird mittelfristig gänzlich entfallen. Außerdem gilt die Klärschlammverordnung mittlerweile auch für die Verwertung bei Maßnahmen des Landschaftsbaus (siehe Kapitel 6 und Anhang II).

Die Menge an Klärschlamm, die in der Landwirtschaft zu Düngezwecken eingesetzt werden darf, ist begrenzt. Gemäß Klärschlammverordnung dürfen in drei Jahren pro Hektar bis zu 5 t Klärschlamm TM aufgebracht werden. Grundsätzlich dürfen nur Klärschlämme verwendet werden, die aus kommunalen Kläranlagen stammen. Im ökologischen Landbau, im Forst, in Gärten, auf Grünland und Ackerfutteranbauflächen, im Obst- und Gemüsebau sowie in Wasserschutz- und Naturschutzgebieten ist die Ausbringung von Klärschlamm generell verboten, um u.a. die Übertragung

von Krankheitserregern sicher zu verhindern. Für den Feldgemüseanbau werden Einschränkungen benannt (siehe AbfKlärV, Kapitel 1). Die Ausbringung von Klärschlamm, Klärschlammgemischen und -komposten ist nur nach vorhergehender Boden- und Klärschlamm-/gemisch-/kompostuntersuchung zulässig. Die Untersuchungen müssen nach einem vorgeschriebenen Schema von einer notifizierten Untersuchungsstelle durchgeführt werden (siehe AbfKlärV, Kapitel 1).

Mit der novellierten Klärschlammverordnung wurde gemäß § 12 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes eine freiwillige regelmäßige Qualitätssicherung eingeführt. Diese von externen Trägern der Qualitätssicherung durchgeführte Qualitätssicherung hat zum Ziel die Kreislaufwirtschaft zu fördern, den Schutz von Mensch und Umwelt sicher zu stellen und das Vertrauen in die landwirtschaftliche Klärschlammnutzung zu stärken. Die Verantwortung verbleibt zwar beim Klärschlammherzeuger, jedoch bringt die Qualitätssicherung von Klärschlämmen, Klärschlammgemischen und -kom-

posten auch Erleichterungen wie einen verminderten Untersuchungsumfang, eine gelockerte Vorlagepflicht der Untersuchungen, eine erleichterte Vermischung von Klärschlämmen sowie die mögliche Befreiung vom Lieferschein mit sich (siehe AbfKlärV, Kapitel 1). Im Klärschlamm sind jedoch nicht nur die laut der Verordnungen zu untersuchenden Stoffe enthalten, es werden auch immer wieder neue Abbauprodukte von Arzneimitteln und andere neuartige Substanzen wie Nanomaterialien und Mikroplastik entdeckt. Diese gelangen u. a. durch menschliche Ausscheidungen und über die Verwendung von Haushaltsprodukten in den Klärschlamm. Es ist kaum möglich, für all diese Stoffe spezielle Nachweisverfahren zu entwickeln und sie auf ihre Umweltwirkung hin zu bewerten. Besonders schwer lässt sich auch die Kombinationswirkung dieser Stoffe und ihrer Abbauprodukte charakterisieren und einschätzen. Toxikologen und Analytiker können nur die potentielle Gefährdung durch solche Stoffe abschätzen – bis zu einer realen Einschätzung sind diese aber schon in die Umwelt gelangt.

Nährstoffe im Klärschlamm

Klärschlamm weist – abhängig von Entwässerungsgrad und Herkunft – unterschiedliche Gehalte an Nährstoffen (wie etwa Stickstoff, Phosphor oder Kalium) auf. Zum Beispiel enthalten 100 t Nassschlamm mit 5 % Trockensubstanz (TS) durchschnittlich etwa 190 kg Stickstoff (N), wovon 55 kg Ammonium-N sind, außerdem 195 kg Phosphat (P_2O_5) und 30 kg Kali (K_2O) (siehe Tabelle 3) [LFL].

Die Nährstoffverfügbarkeit des Klärschlammes wird von vielen Faktoren beeinflusst. So hängt die Bindungsform des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors u. a. von der Art der Phosphor-Fällung auf der Kläranlage ab. 60 bis 80 % liegen je nach Fällungsverfahren (chemisch oder biologisch) in anorganischer Form vor, davon sind zwischen rund 1 und 38 % wasserlöslich [KRATZ/SCHNUG]. Die tatsächliche Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie zum Beispiel dem pH-Wert, der Pufferwirkung des Bodens und des Düngemittels, den Gehalten an Eisen und Aluminium im Klärschlamm oder den Pflanzen selbst. Ein ungünstiges Phosphor-Eisen-Verhältnis kann die Pflanzenverfügbarkeit stark vermindern [ABD EL-SAMIE]. Deshalb sollte für Klärschlamm, der bodenbezogen

verwertet werden soll, eine biologische P-Fällung einer chemischen P-Fällung während des Abwasserbehandlungsprozesses vorgezogen werden.

Das 2017 novellierte Düngerecht verschärft die Regelungen für die Ausbringung stickstoff- und phosphathaltiger Düngemittel wie Klärschlamm. So sollen Umweltbelastungen infolge von Düngung verringert und die Düngeneffizienz erhöht werden. Phosphat darf laut geltendem Düngerecht auf Böden mit Gehalt von mehr als 20 mg P_2O_5 je 100 g Boden (nach CAL-Methode) nur noch bedarfsbezogen (höchstens bis in Höhe der voraussichtlichen Phosphatabfuhr) ausgebracht werden. Der Düngbedarf für Stickstoff und Phosphor ist durch eine verpflichtende Düngedarfsermittlung nach genau festgelegten Vorgaben zu erstellen. Bei der Bedarfsermittlung müssen u.a. die zu erwartenden Erträge und Qualitäten, die im Boden verfügbaren Nährstoffmengen, der standortspezifische Pflanzenbestand und die Nährstoffnachlieferung berücksichtigt werden. Als Mindestwirksamkeit im Jahr des Aufbringens ist für flüssigen Klärschlamm 30 % vom Gesamtstickstoff und für festen Klärschlamm 25 % vom Gesamtstickstoff anzusetzen (siehe DüV, Kapitel 1).

Laut Klärschlammverordnung dürfen maximal 5 t Klärschlamm (TS)/ ha in drei Jahren ausgebracht werden. Dieser Menge entspricht zum Beispiel 100 m³ Klärschlamm mit 5 % TM (siehe AbfklärV, Kapitel 1).

Die Düngewirksamkeit im Jahr der Ausbringung hängt für Stickstoff im Wesentlichen vom Ammonium-Stickstoff-Gehalt ab. Dieser Anteil ist vollständig pflanzenverfügbar, was in der Düngeplanung zu berücksichtigen ist. Wegen des hohen Verlustpotentials flüssiger Klärschlämme für Ammoniakemissionen (> 20% Verlust des ausgebrachten Stickstoff), sind diese

nach Möglichkeit emissionsarm auszubringen oder nach der Ausbringung auf unbestelltem Ackerland unverzüglich einzuarbeiten. Die Wirksamkeit des organisch gebundenen Stickstoffs liegt bei ca. 10% im Jahr der Ausbringung bei ca. 3% Nachlieferung in den Folgejahren. Mit der novellierten DüV muss die über Klärschlämme aufgebraachte Stickstoff-Menge komplett in die betriebliche Obergrenze von 170 kg Stickstoff pro Hektar und Jahr mit einbezogen werden. Ebenso muss beim Nährstoffvergleich der Gesamtstickstoffgehalt berücksichtigt werden, ohne Abzug von Ausbringungsverlusten.

Schadstoffe im Klärschlamm

Die Schwermetallbelastung im Klärschlamm hat sich in den letzten 15 bis 20 Jahren in der Regel auf ein niedriges Niveau eingependelt. Dagegen rücken in letzter Zeit organische Schadstoffe in den Mittelpunkt der Betrachtung. Allerdings ist das Stoffspektrum, auf das der Klärschlamm untersucht werden muss, begrenzt.

Die Aktualisierung des Düngerechts und die Novellierung der Klärschlammverordnung bringen auch einen veränderten Untersuchungsumfang für Klärschlamm mit sich. So kamen die Schwermetalle Chrom (VI) (Cr(VI)), Arsen (As), Thallium (Tl) und Eisen (Fe) neu hinzu. Für Blei (Pb), Cadmium (Cd), Nickel (Ni) und

Tab. 11

Alte und neue Grenzwerte gemäß Klärschlammverordnung und Düngemittelverordnung

Die fett markierten Werte gelten aktuell für Klärschlamm.

Parameter	KlärV (alt)	KlärV (neu)	DüMV	Einheit
Pb	900	–	150	mg/kg TS
Cd	10 (ab 5 % P ₂ O ₅ (FM))	–	1,5 (50 mg/kg P₂O₅)	mg/kg TS
Cr	900	nur messen	–	mg/kg TS
Cr(VI)	–	–	2	mg/kg TS
Cu	800	–	900	mg/kg TS
Ni	200	–	80	mg/kg TS
Hg	8	–	1,0	mg/kg TS
Zn	500	4.000	–	mg/kg TS
As	–	–	40	mg/kg TS
Tl	–	–	1,0	mg/kg TS
Fe	–	nur messen	–	mg/kg TS
PCB	0,2	0,1	–	mg/kg TS
PCDD(F)* einschl. dl-PCB	100	–	30	ng/kg TS
AOX	500	400	–	mg/kg TS
B(a)P	–	1	–	mg/kg TS
PFT	–	–	0,1	mg/kg TS

* Furane sind laut DüMV nicht im Grenzwert enthalten, sollen aber laut AbfklärV mit gemessen werden

Quecksilber (Hg) gelten niedrigere, also strengere Grenzwerte als zuvor. Die Grenzwerte für Kupfer (Cu) und Zink (Zn) hingegen wurden angehoben. Chrom (Cr) muss lediglich gemessen werden, ebenso Eisen (Fe).

Hinsichtlich der organischen Stoffe kamen stellvertretend für die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK), Benzo(a)pyren (B(a)P) sowie die perfluorierten Tenside (PFT) zum Untersuchungsumfang hinzu. Die Grenzwerte für polychlorierte Biphenyle (PCB) und polychlorierte Dibenzop-dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F) sowie adsorbierbare organisch gebundene Halogene (AOX) wurden gesenkt. Der neue Untersuchungsumfang für Schwermetalle und organische Schadstoffe wird in der Tabelle 11 dargestellt.

PFT sind beispielsweise erst vor kurzem als relevante Inhaltsstoffe des Klärschlammes erkannt worden. Da diese Stoffgruppe aufgrund ihrer Eigenschaften viel-

seitig verwendet wird, nimmt auch ihre Verteilung in der Umwelt zu. PFT dienen zur Herstellung von Imprägnierungen und Polymeren (u.a. Teflon® und Gore-Tex®) und werden als gesundheitlich bedenklich eingestuft. Es wurde bereits mit dem Übergang ins Düngerecht ein Klärschlammgrenzwert eingeführt (0,1 mg/kg TS).

Viele PAK besitzen krebserregende, toxische Eigenschaften. Deshalb wurde in der novellierten Klärschlammverordnung erstmalig auch für Klärschlamm ein Grenzwert für B(a)P festgelegt (1 mg/kg TS), das häufig als Leitparameter für PAK herangezogen wird.

Nach wie vor gibt es keine Grenzwerte für Schadstoffe wie Uran, Nanomaterialien oder medizinische Rückstände wie Antibiotika oder Hormone, da diese zum Teil schwer analytisch nachweisbar sind oder keine Einigung zu konkreten Grenzwerten und Gefahrenpotentialen erzielt werden kann.

Vor- und Nachteile der bodenbezogenen Klärschlammverwertung

Bevor auf die Bedeutung von Phosphor, die gesetzlichen Neuregelungen zur Phosphorrückgewinnung und auf dessen Stand der Technik eingegangen wird, sollen kurz die Vor- und Nachteile der bodenbezogenen

Klärschlammverwertung in Tabelle 12 dargestellt werden. Die Problematik beim Umgang mit bzw. mit der Entsorgung von Klärschlamm liegt in seiner Bedeutung als Schadstoffsenske und Nährstofflieferant.

Tab. 12

Vor- und Nachteile der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm

Vorteile	Nachteile
Klärschlämme werden gründlich auf Schadstoffe untersucht, AbfklärV und DüMV sehen Grenzwerte für Schwermetalle und organische Schadstoffe vor	Neben den geregelten Stoffen können im Klärschlamm eine Reihe von unbekanntem bzw. nicht geregelten Schadstoffen enthalten sein (z. B. Nanomaterialien, Mikroplastik, Antibiotikarückstände, Tributylzinn (TBT), Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW), diverse Krankheitserreger)
Hoher Anteil an organischer Substanz (günstig für die Humusbildung)	Mögliche Gefahr des Eintrags und Anreicherung von Schadstoffen in Böden
Nachlieferung an notwendigen Nährstoffen	Risiko der Überdüngung und Nährstoffauswaschung
Günstiger Phosphordünger, keine Importabhängigkeit	Die direkte Pflanzenverfügbarkeit des Phosphats hängt wesentlich davon ab, in welcher Form die Ausfällung erfolgte. Phosphorrückführung über Phosphorrückgewinnung ebenfalls möglich
Bodenuntersuchung vor Klärschlammaufbringung (diese erfolgt auf Veranlassung und zu Lasten der Betreiber der Kläranlage)	Wirkung von Klärschlamm auf Boden z. B. über den Eintrag antibiotikaresistenter Mikroorganismen oder nicht geregelter Schadstoffe ist ungeklärt

06

Phosphorrückgewinnung

- ▶ Phosphorrückgewinnungspotentiale und -verfahren
- ▶ Deutschland auf dem Weg zum wirtschaftlichen Phosphorrecycling
- ▶ Verwertungswege der Klärschlammverbrennungsraschen

Phosphor (P) ist ein Element, welches in der Natur ausschließlich in gebundener Form, meist in Form von Phosphat (PO_4) in der Erdkruste zu finden ist. Phosphat ist ein nicht erneuerbarer Rohstoff, der zum größten Teil als Phosphatgestein bergmännisch abgebaut und aus den anfallenden Erzen gewonnen wird. Die Reserven an Phosphatgestein sind marinsedimentär, magmatisch oder als Guanoablagerung entstanden, wobei die sedimentär gebildeten Lagerstätten überwiegen. Die langfristige Rohphosphatversorgung ist davon abhängig, inwieweit Lagerstätten verfügbar sind und wirtschaftlich und technisch genutzt werden können. Bei einer Jahresförderung von 58 Mio. t P_2O_5 (Menge, die 2017 weltweit abgebaut wurde) könnten die derzeit wirtschaftlich abbaubaren Phosphatvorkommen den weltweiten Bedarf in der Landwirtschaft (> 40 Mio. t) noch über 320 Jahre decken [BGR 2013].

Allerdings gehen die Angaben der statischen Reichweite (Verfügbarkeit bei gleichbleibendem Verbrauch) stark auseinander. Auf der einen Seite nimmt der weltweite Bedarf an Phosphat ständig weiter zu [FAO], auf der anderen werden immer wieder neue Phosphatvorkommen erschlossen, deren Abbaubarkeit mit anwachsendem Bedarf steigt. Die U.S. Geological Survey geht von einem jährlichen Anstieg des globalen Phosphatdüngerbedarfes von über 2% aus (das entspricht über 5 Mio. t/a), wobei ca. 90% dieses Mehrbedarfes durch Asien und Amerika verursacht werden [USGS; FAO]. Dabei spielen das Wachstum der Weltbevölkerung und das Streben nach einem höheren Lebensstandard der Menschen in den Entwicklungsländern die größte Rolle. Vor allem der damit einhergehende Anstieg des Fleischkonsums wird den Phosphatverbrauch weltweit in die Höhe treiben, denn Nutztiere verbrauchen während der Aufzucht wesentlich mehr Phosphor in Form von Futter, als sie beim Schlachten liefern. Hinzu kommt, dass nur ein Teil dieses Phosphors genutzt

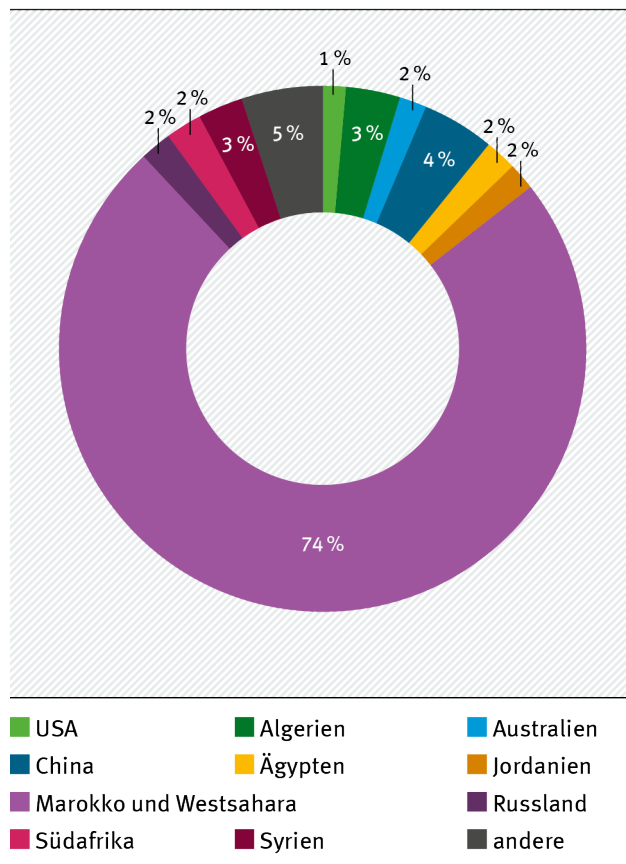
wird, der Rest geht über die thermische Behandlung der tierischen Nebenprodukte (= Reststoffe, die nicht für den menschlichen Verzehr geeignet oder vorgesehen sind) und die Entsorgung der entstandenen Aschen (Kategorie I) verloren. Die höchsten Anstiege an Phosphatdüngerbedarf werden mit bis zu 6,3% in Asien, die niedrigsten mit 0,1% für Westeuropa prognostiziert [FAO].

Problematisch ist außerdem die abnehmende Qualität der vor allem aus sedimentären Lagerstätten abgebauten Rohphosphate durch zunehmende Kontamination mit toxischen Schwermetallen (vor allem Cadmium mit bis zu 147 mg/kg Phosphor) [SCHEIDIG] und Radionukliden (v. a. Uran mit bis zu 687 mg/kg P) [RÖMER et al.] und die damit verbundenen Risiken für Mensch und Umwelt. Der sogenannte „Phosphor-Peak“, also jener Zeitpunkt, ab dem das Phosphorangebot die gestiegene Nachfrage nicht mehr decken kann, wird einer aktuellen Studie zufolge für das Jahr 2051–2092 erwartet [CORDELL et al.].

Aus Abbildung 8 geht hervor, dass sich etwa 95% der Lagerstätten unter der Kontrolle von nur zehn Staaten befinden und über 80% der wirtschaftlich abbaubaren Phosphatvorkommen auf der Erde in Afrika zu finden sind. Der Umstand, dass Marokko, der nach Russland zweit wichtigste Rohphosphatlieferant der EU, seinen Phosphorreichtum der von den Vereinten Nationen nicht anerkannten Annexion von West Sahara verdankt, birgt schon jetzt ein großes Konfliktpotential und ist hinsichtlich der Versorgungssicherheit Deutschlands und der EU als bedenklich einzustufen. Das mit Abstand größte Rohphosphat abbauende Land ist China, welches mehr als die Hälfte der im Jahr 2016 weltweit geförderten 261 Mio. t Rohphosphate stellte. Obwohl die USA ihre jährliche Phosphatproduktion auf etwa 28 Mio. t im Jahr 2016 angehoben haben, müssen zur Deckung des eigenen Phosphorbedarfes zusätzlich Rohphosphate importiert werden. Da auch China seine Phosphor-Exporte stark reglementiert, ergibt sich die Situation, dass über 80% des weltweit gehandelten Rohphosphates durch die Länder Nordafrikas bzw. des mittleren Ostens abgedeckt werden. Europas einzige Phosphatmine befindet sich in Finnland, deren Reserven mit 2.300 Mio. t aber weniger als 1% der globalen Vorkommen ausmachen [GTK]. Die Weltressourcen, von denen aber bei weitem nicht alle eine ausreichende Abbauwürdigkeit aufweisen, werden auf mehr als 300 Billionen t geschätzt [USGS].

Abbildung 8

Globale Verteilung der erkundeten Reserven von Rohphosphat für 2016



Quelle: [USGS]

Deutschland ist vollkommen vom Import von Rohphosphaten bzw. den daraus hergestellten Mineraldüngern abhängig. Phosphor stellt daher insbesondere als Pflanzennährstoff eine strategische Ressource dar, von der im Wirtschaftsjahr 2016/2017 in Deutschland 231.100 t P₂O₅ in Form mineralischer Phosphatdünger verbraucht wurden [DESTATIS A]. 2014 wurde Phosphatgestein von der Europäischen Kommission in die Liste der kritischen Rohstoffe aufgenommen [EC].

Phosphorrückgewinnungspotentiale und -verfahren

Angesichts der vorangehend geschilderten Situation, insbesondere der wachsenden Erdbevölkerung und dem damit einhergehenden Phosphormehrbedarf [FAO], wird die Nutzung sekundärer Phosphorquellen in Zukunft eine deutlich größere Rolle für die Versorgungssicherheit, die menschliche Gesundheit und die Schonung der natürlichen Ressourcen spielen als bisher. Deshalb beschäftigen sich Politik und Wissenschaft schon seit einigen Jahren mit der Entwicklung von geeigneten Rückgewinnungstechniken. Bereits 2004-2011 wurde im Rahmen einer Initiative der Bundesregierung für den Ressourcenschutz vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und vom damaligen Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) die Entwicklung von Verfahren sowie die großtechnische Umsetzung von Techniken zur Rückgewinnung von Phosphor gefördert. Hierbei wurden die Stoffströme kommunaler Klärschlamm, kommunales Abwasser, Überschussgülle, Tiermehl und andere phosphorhaltige, organischen Materialien betrachtet. Die nachfolgende Tabelle 13 zeigt die Recyclingpotentiale einiger Stoffströme in Deutschland.

Mit der Entscheidung der Bundesregierung (Koalitionsvertrag, 2013) die Klärschlammausbringung zu Düngezwecken zu beenden und Phosphor sowie andere Nährstoffe aus dem Klärschlamm zurückzugewinnen, rückte insbesondere der Stoffstrom

Abwasser bzw. die anfallenden Klärschlämme und Klärschlammverbrennungssaschen in den Fokus technischer Entwicklungen [KOALITIONSVERTRAG 2013]. In diversen Forschungsvorhaben wurden Fällungs-, Kristallisations-, Adsorptions-, nasschemische Aufschluss-, thermochemische und metallurgische Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, Schlammwasser und Klärschlammmasche mit dem Ziel entwickelt, den enthaltenen Phosphor zurückzugewinnen und die im Prozess entstehenden, sogenannten Recyclate stofflich nutzbar zu machen.

Als besonders aussichtsreich, Phosphor gemäß Düngemittelverordnung in ausreichender Düngqualität zurückzugewinnen, können sowohl nasschemische Verfahren, z. B. mit dem durch Fällung gewonnenem Magnesium-Ammonium-Phosphat (MAP bzw. Struvit), als auch thermische Verfahren erachtet werden.

Die nasschemischen Verfahren ermöglichen in der Regel eine Rückgewinnung von 5–30% des im Kläranlagenzulauf enthaltenen Phosphors, da zumeist nur der Teil des Phosphors, welcher im Schlammwasser verfügbar vorliegt, zurück gewonnen wird. Diese Verfahren sind häufig relativ einfach und kostengünstig umzusetzen und liefern ein schadstoffarmes Recyclat, welches nicht zuletzt wegen seiner zumeist guten Pflanzenverfügbarkeit als

Tab. 13

Theoretische Phosphor-Recyclingpotentiale verschiedener Stoffströme in Deutschland

Stoffstrom	Geschätzte rückgewinnbare Menge P in t/a
Kommunale Abwässer (Zulauf)	61.600*
Industrielle Abwässer (Zulauf)	15.000
Kommunaler Klärschlamm	50.000
Klärschlammmasche	50.000
Wirtschaftsdünger	444.000
Gärrückstände	125.000
Tierische Nebenprodukte (Kategorie 1-3, ohne Tierfette)	40.000**
Geschätzter Verbrauch an P in Deutschland	124.000*

* LAGA, 2015, ** NIEMANN – STN, 2017

Quelle: [LAGA 12; LAGA 15; NIEMANN; EIGENE ZUSAMMENSTELLUNG]



NP-Dünger (Stickstoff (N)-Phosphor (P)-Dünger) bzw. als Rohstoff für die Düngemittelherstellung geeignet ist. Allerdings ist der verbleibende organische Anteil, je nach Grad der anschließenden Aufreinigung des Recyclats [MAP bzw. Struvit, CaP (Calcium Phosphat), CSH (Calcium-Silikat-Hydrat)], verhältnismäßig hoch, womit auch die Gefahr steigt, dass sich unerwünschte Rückstände im Recyclat wiederfinden lassen.

Thermische oder thermisch-metallurgische Verfahren sind im Vergleich zu den nasschemischen Fällungsverfahren technisch aufwändiger und somit auch häufig wesentlich teurer in Umsetzung und Betrieb. Viele Verfahren ermöglichen jedoch eine hohe Rückgewinnung von bis zu mehr als 90% des im Kläranlagenzulauf enthaltenen Phosphors. Ein weiterer Vorteil ist die Zerstörung der im Schlamm enthaltenen organischen Schadstoffe während der Verbrennung. Die Pflanzenverfügbarkeit der erhaltenen Recyclate ist je nach Verfahren sehr unterschiedlich zu bewerten. Wesentlich für eine effiziente thermische oder thermo-metallurgische Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm bzw. Klärschlamm-Asche ist die Monoverbrennung (ggf. Verbrennung mit anderen rückstandslosen Stoffen) des Klärschlammes, da hier der Phosphor in relativ hohen Konzentrationen und mit einem überschaubaren Anteil an Verunreinigungen durch z. B. Schwermetalle vorliegt.

Würde die Verbrennung des in Deutschland insgesamt anfallenden Klärschlammes (gut 1,8 Mio. t TM/a) komplett auf Monoverbrennung mit nachgeschalteter

Phosphorrückgewinnung umgestellt werden, ließen sich theoretisch aus der anfallenden Asche rund 50.000 t Phosphor pro Jahr zurückgewinnen. Dies entspricht gut 40% des aktuellen landwirtschaftlichen Verbrauchs an mineralischem Phosphor. Da Klärschlammverbrennungsaschen rechtlich als Düngemittel zugelassen sind, könnten diese, bei Einhalten der Grenzwerte nach Düngemittelverordnung, direkt zu Düngezwecken eingesetzt werden. Der Anteil an Aschen mit höheren Schadstoffgehalten müsste einer Phosphorrückgewinnung zugeführt werden.

Vergasungs-, Pyrolyse- oder Karbonisierungs-(HTC-) Verfahren werden seit einigen Jahren ebenfalls mit dem Ziel der stofflichen Verwertung des im Klärschlamm enthaltenen Phosphors entwickelt und großtechnisch getestet. Bisher lässt sich nicht abschließend beurteilen, inwieweit eine gemäß Klärschlammverordnung geforderte Phosphorrückgewinnung sowie der Erhalt eines (aus rechtlicher und stofflicher Sicht) zu Düngezwecken einsetzbaren Recyclats möglich sind.

Tabelle 14 gibt einen Überblick über weltweit entwickelte Verfahren zur Phosphorrückgewinnung. Ein Großteil der hier dargestellten Verfahren wurde in Deutschland entwickelt. Jedoch konnten bisher nur sehr wenige als Pilotanlagen oder im großtechnischen Maßstab realisiert werden. Die meisten Verfahren wurden lediglich im Labor- oder Technikumsmaßstab betrieben und nicht alle erzeugen ein verwertbares oder als Düngemittel zugelassenes Recyclat.

Tab. 14

Überblick über entwickelte Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlammasche

Wässrige Phase/ Schlammwasser/ Prozesswasser	Klärschlamm/ Faulschlamm	Klärschlammasche
Adsorptionsverfahren	Air Prex / MAP-Verfahren	AshDec (SUSAN)
Air Prex/ MAP-Verfahren	Aqua Reci	BioCon
CSIR Wirbelbettreaktor	ATZ-Eisenbatreaktor	Bioleaching
DHV Crystallactor	CAMBI	Ecophos
Ebara	Elophos	Eisenbadreaktor (ATZ)
Ekobalans	ExtraPhos (Budenheimer Verfahren)	Eberhard-Verfahren
Kurita Festbett	FIX-Phos	EPHOS
Magnetseparator	Gifhorner-Verfahren	EuPhoRe
MAP Kristallisation Treviso	KEMIKOND	Inocre
Nachfällung/Flockungsfiltration	Kemira-KREPRO	Kubota
NuReBas-Prozess	KREPRO	LEACHPHOS
NuReSys	Leachphos/ Zar	Mephrec (KRN)
Ostara PEARL™	LOPROX	PARFORCE
Phosiedi	MEPHREC	PASCH
Phosnix	NuReSys	PhosRec (Koop Schiefer)
PHOSPHAQ	Peco	RECOPHOS (AT)
PHOSTRIP	Phostrip	RecoPhos (DE)/Seraplant
PRISA	POPROX-Verfahren	Rhenania
P-RoC (Prophos)	PRISA	SEPHOS
RECYPHOS	PROXNAN	SESAL(-Phos)
REPHOS	Seaborne	TetraPhos
RIM NUT Ionenaustauscher	SESAL-Phos	Thermphos
Struvia	Stuttgarter Verfahren	
Sydney Water Board Reactor	Unitika-Phosnix	
	Pyrolyse/HTC-Verfahren	

Quelle: [EIGENE ZUSAMMENSTELLUNG]

Deutschland auf dem Weg zum wirtschaftlichen Phosphorrecycling

Die internationale Forschungs- und Entwicklungslandschaft spiegelt das gestiegene Interesse an Rückgewinnungstechniken wider, die es ermöglichen, den in verschiedenen „Abfallstoffströmen“ enthaltenen Phosphor zurückzugewinnen und stofflich nutzbar zu machen. Deutschland ist in puncto Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet unter den führenden Nationen. Jedoch sind Staaten wie Kanada, Japan und die USA bei der großtechnischen Realisierung Vorreiter. Hier wurden verschiedene Verfahren großtechnisch umgesetzt und befinden sich seit einigen Jahren erfolgreich im Betrieb (z. B. Ostara PEARL).

Auch in Deutschland stehen bereits eine Vielzahl verschiedener technischer Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlamm, Schlammwasser und Klärschlammmasche zur Verfügung. Die meisten befinden sich jedoch noch im Versuchsstadium. An einer großtechnischen Umsetzung einer Reihe von Verfahren wird derzeit intensiv gearbeitet. Tabelle 15 gibt einen Überblick zum aktuellen Stand der Umsetzung der technischen Phosphorrückgewinnung in Deutschland.

Für die nächsten Jahre gilt es, die technischen, rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen zu verbessern, die es den neuen Verfahren ermöglichen, sich im Kreislaufwirtschaftssystem zu etablieren. Ein erster wichtiger Schritt dahingehend ist mit der Verabschiedung der novellierten Klärschlammverordnung am 03.10.2017 getan (siehe AbfKlärV, Kapitel 1).

In der Schweiz trat bereits 2016 ein Gesetz in Kraft, welches die Phosphorrückgewinnung aus dem Abwasserstrom sowie aus Tiermehl vorschreibt. Dieses hat zum Ziel, die Schweiz von einem Phosphor-Importland zu einem Phosphor-Exporteur zu machen. Für die Rückgewinnung wird eine Übergangsfrist bis 2026 eingeräumt, konkretisierende Vorgaben werden in einer Vollzugshilfe geregelt. In der Schweiz ist die Klärschlammdüngung seit 2006 nicht mehr erlaubt. Großtechnische Anlagen zur Phosphorrückgewinnung aus Klärschlammmasche wurden jedoch aktuell noch nicht umgesetzt.

In Tabelle 15 sind die in Deutschland bereits realisierten bzw. konkret geplanten Anlagen zur Phosphorrückgewinnung mit einigen wichtigen Parametern zusammengefasst.

Voraussetzung für den Erfolg der großtechnischen Umsetzung eines Rückgewinnungsverfahrens ist die Verwendbarkeit des rückgewonnenen Phosphors. Nur wenn ein marktfähiges, also qualitativ und quantitativ zufriedenstellendes und rechtlich zugelassenes Recyclat rückgewonnen wird, wird sich ein Verfahren langfristig wirtschaftlich betreiben lassen. Die hier vorgestellten Verfahren liefern Recyclate, die als Düngemittel eingesetzt werden dürfen, oder Ausgangsstoffe für Düngemittel bzw. Phosphorsäure ergeben.

Die Schadstoffbelastungen der Recyclate aus der Phosphorrückgewinnung sind häufig geringer als die konventioneller Mineraldünger. Rückgewonnener Phosphatdünger enthält deutlich weniger Cadmium und Uran als die aus sedimentären Rohphosphaten hergestellten Düngemittel [RÖMER et al.]. Eine Schadstoffentfrachtung erfolgt bei der konventionellen Düngemittelproduktion aktuell nicht.

Die erforderliche Nährstoffverfügbarkeit, d.h. eine ausreichende Düngewirkung, ist bei den meisten der aus den umgesetzten Verfahren gewonnenen Recyclate gegeben. Bei vergleichenden Untersuchungen der Pflanzenverfügbarkeit verschiedener phosphorhaltiger Recyclate aus der Phosphorrückgewinnung mit marktgängigen mineralischen Düngern wurde festgestellt, dass sich hohe Eisengehalte, verursacht durch den Einsatz von Eisensalzen als Fällmittel, negativ auf die Pflanzenverfügbarkeit auswirken. Als gut pflanzenverfügbar haben sich Recyclate aus Kläranlagen mit dem Bio-P-Verfahren erwiesen. Häufig verfügen die Recyclate aus Fällungsverfahren über eine bessere Pflanzenverfügbarkeit als Recyclate aus Klärschlammmasche. Die Düngewirksamkeit der Recyclate ist darüber hinaus abhängig von einer ganzen Reihe von Parametern wie Bodenart, Pflanze, Art der P-Fällung bei der Abwasserbehandlung usw.

Recyclate, die aus Klärschlammmasche erzeugt wurden, sind frei von organischen Reststoffen und enthalten, im Gegensatz zu einigen Recyclaten aus Fällungsverfahren, somit auch keine Rückstände organischer Verunreinigungen mehr. Der Gehalt an Schwermetallen in den Recyclaten ist stark abhängig vom jeweiligen Rückgewinnungsverfahren sowie vom eingesetzten Klärschlamm.

Tab. 15

In Deutschland realisierte bzw. konkret geplante grosstechnische Anlagen (Stand 2018)

Betreiber/Standort	Verfahren	Input	Output	Betriebsbeginn/ Stand
Seaborne EPM AG/ KA Gifhorn	Seaborne (MAP-Fällung)	120 m ³ /d Gärsubstrat	MAP/Struvit	2007 Demonstrationsanlage, zeitweiliger Betrieb
Remondis Aqua/ Altentreptow	REPHOS MAP-Fällung	Molkereiabwasser (80 mg P/l)	MAP/Struvit	2007
Berliner Wasserbe- triebe/ Berlin-Waß- mannsdorf	AirPrex Handels- name: „Berliner Pflanze“, MAP-Fällung	Faulschlamm	MAP/Struvit	2011
Neuwerk-Mönchen- gladbach	Airprex	Faulschlamm	MAP/Struvit	2009
Braunschweig- Steinhof	Airprex, MAP-Fällung	Faulschlamm	MAP/Struvit	2015
Uelzen	Airprex, MAP-Fällung	Faulschlamm	MAP/ Struvit	2014
Salzgitter	Airprex, MAP-Fällung	Faulschlamm	MAP/ Struvit	2012
Lingen	Elophos (MAP-Ver- fahren)	Faulschlamm	MAP/Struvit	2017
Hildesheim	FIX-Phos	Faulschlamm	CaP	2012
Mainz-Mombach	Budenheim Extra- Phos	Faulschlamm	CaP	2017 / Pilotanlage
Offenburg	Stuttgarter Verfah- ren/MAP Fällung	Faulschlamm	MAP/Struvit	2011
Neuburg	P-Roc	Faulschlamm	P-haltiges CSH	
SUN-Nürnberg	Mephrec	Klärschlamm (25% TS), 60.000 t/a (oder Klärschlammasche)	P-Schlacke	2016 / Demonstrationsanlage
Remondis-Hamburg	Tetra-Phos/Nass- chemisch	Klärschlammasche	P-Säure (H ₃ PO ₄)	2015 Versuchsphase / 2018 großtechnische Umsetzung

Quelle: [EIGENE ZUSAMMENSTELLUNG]

Tab. 16

Vergleich nasschemischer und thermischer bzw. den thermischen nachgeschaltete Verfahren

	nasschemisch	thermisch oder nachgeschaltet
Vorteile	Kostengünstige Realisierung	Hoher Rückgewinnungsgrad von > 90 % (Gesetzliche Vorgaben werden eingehalten)
	Leicht nachzurüsten und relativ einfach zu betreiben	Simultane stoffliche und energetische Nutzung des Klärschlammes
	Zumeist gute Pflanzenverfügbarkeit der Rückgewinnungsprodukte	Vollständige Zerstörung organischer Schadstoffe
	Betriebliche Vorteile (spontane Struvitbildung wird unterbunden, verbesserte Schlammentwässerbarkeit)	Flexibel einsetzbar (zumeist für alle Klärschlämme und andere Stoffe geeignet)
Nachteile	Rückgewinnungsgrad derzeit < 50 % (unter den gesetzlichen Vorgaben)	Hohe Investitionskosten
	Zumeist nur für Bio-P-Anlagen geeignet	Aufwändige Verfahrensführung (Technisches Personal erforderlich)

Heute übersteigen die Kosten der meisten phosphorhaltigen Recyclate den Marktpreis für mineralischen Phosphordünger um ein Vielfaches. Lediglich die nasschemischen Fällungsverfahren lassen sich aktuell wirtschaftlich betreiben, da diese verfahrenstechnische Vorteile für den Kläranlagenbetrieb mit sich bringen. Spontane Ausfällungen von Struvit werden durch den Einsatz von z. B. Airprex verhindert und durch die Reduktion des Phosphorgehalts wird die Schlammentwässerbarkeit erhöht. Auch das von der Firma Remondis Aqua für Molkereiabwässer realisierte REPHOS-Verfahren hat sich bislang bewährt.

Anlagen, bei denen thermische bzw. der thermischen Behandlung nachgeschaltete Verfahren in die großtechnische Praxis umgesetzt wurden, befinden sich derzeit noch nicht in Betrieb, stehen allerdings z. T. kurz davor (siehe z. B. TetraPhos). Theoretisch kann davon ausgegangen werden, dass Phosphorrückgewinnungsverfahren, die zurzeit nicht wirtschaftlich rentabel betrieben werden können, diese Wirtschaftlichkeit bei den heute prognostizierten Weltmarktpreisen für Phosphor mittelfristig erreichen werden. Voraussetzung hierfür ist immer, dass die rückgewonnenen phosphorhaltigen Recyclate entsprechende Qualitäten (z. B. Nährstoffverfügbarkeit, Schadstofffreiheit) sowie eine rechtliche Zulassung (z. B. als Düngemittel) aufweisen und sich ein Markt für sie ergibt. Eine kurze Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der nasschemischen und der

thermischen Rückgewinnungsverfahren ist in Tabelle 16 dargestellt.

Die Forcierung der technischen Phosphorrückgewinnung kann über gesetzliche Vorgaben, wie jüngst mittels Novellierung der Klärschlammverordnung mit Pflicht zur Phosphorrückgewinnung, erreicht werden. Darüber hinaus wurden in der Vergangenheit weitere politische Instrumente diskutiert. Die Einführung einer Beimischungsquote im Bereich der Phosphorrückgewinnung wird aktuell nicht gefordert. Um dennoch die Entwicklung voranzubringen und hohe Phosphorrückgewinnungsmengen zu erreichen, schlägt z. B. die Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) in ihrem Bericht „Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven“ verschiedene Maßnahmen, wie etwa eine Selbstverpflichtung der Produzenten oder die Einrichtung eines Fonds, vor [LAGA15]. Darüber hinaus werden immer wieder gezielt großtechnische Umsetzungen der Phosphorrückgewinnung gefördert (z. B. EFRE Baden-Württemberg, Umweltinnovationsprogramm (UIP)). Flankierend sollte die Überführung von Recyclaten aus der Phosphorrückgewinnung in den Produktstatus (z. B. Abfallende, Düngerecht, Anforderungen nach REACH) erleichtert werden.

Die Vor- und Nachteile der aktuell möglichen Klärschlammverwertungswege werden in Tabelle 17 zusammengefasst.

Tab. 17

Vor- und Nachteile der momentanen Klärschlammverwertungswege

Verwertungsweg	Vorteile	Nachteile
Direkte bodenbezogene Verwertung (Landwirtschaft, Landschaftsbau)	<p>Nutzung des Phosphors, aller enthaltenen Nährstoffe und der humusbildenden Organik</p> <p>Verwertungsweg, der (zumindest bislang) die geringsten Kosten verursacht</p>	<p>Klärschlamm birgt hygienische Risiken für Mensch und Umwelt</p> <p>Klärschlamm enthält viele nicht gesetzlich geregelte Schadstoffe, die so nicht aus dem Kreislauf entfernt, sondern angereichert werden</p> <p>Möglichkeit wird mittelfristig für Kläranlagen > 50.000 EW entfallen</p>
Monoverbrennung mit nachgeschalteter Phosphorrückgewinnung	<p>Zerstörung aller organischen Schadstoffe und Erreger im Klärschlamm</p> <p>Langfristige Entsorgungsplanung gemäß der gesetzlichen Anforderungen für Kläranlagenbetreiber</p> <p>Energiegewinnung</p> <p>Rückgewinnung von Phosphor aus der Asche gemäß der gesetzlichen Vorgaben möglich</p> <p>thermische Behandlung in Verbindung mit einer Phosphorrückgewinnung aus der Asche schont Ressourcen und eröffnet neue Märkte</p>	<p>Phosphorrückgewinnung aus der Asche derzeit noch technisch aufwändig und kaum großtechnisch erprobt</p> <p>Eventuell zusätzliche Belastung durch Transport</p> <p>Verursacht als Verwertungsweg die höchsten Kosten</p>
Mitverbrennung mit vorgeschalteter Phosphorrückgewinnung	<p>Zerstörung aller organischen Schadstoffe und Erreger im Klärschlamm</p> <p>Energiegewinnung</p> <p>Ressourcenschonung durch Brennstoffeinsparung und Zuschlagstoffersatz</p> <p>Thermische Behandlung in Verbindung mit einer vorhergehenden Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm schont Ressourcen</p> <p>Kostengünstigerer Entsorgungsweg als die Monoverbrennung</p>	<p>Künftig nur für Klärschlämme mit geringem oder reduziertem Phosphorgehalt geeignet, da keine Nutzung oder Rückgewinnung des Phosphors möglich, womit die gesetzliche Vorgaben nicht eingehalten werden</p> <p>Aktuell etablierte vorgeschaltete Rückgewinnungsverfahren für Klärschlamm liefern zumeist Phosphorrückgewinnungsraten, die unter den gesetzlichen Anforderungen liegen</p> <p>Eventuell zusätzliche Belastung durch Transport</p>

Verwertungswege der Klärschlammverbrennungsaschen

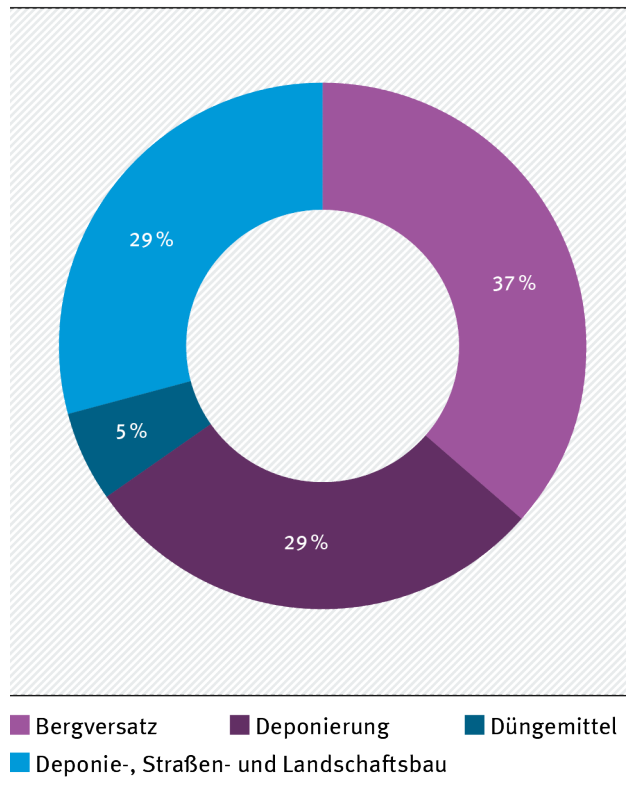
Mittlerweile besteht von der Gesetzgebung her die Möglichkeit, Klärschlammverbrennungsaschen oder kohlenstoffhaltige Rückstände separat abzulagern. Laut Klärschlammverordnung ist die Möglichkeit der Langzeitlagerung (mit Pflicht zur späteren Phosphorrückgewinnung) gegeben, wenn eine Vermischung mit anderen Abfällen und ein Verlust des Phosphors ausgeschlossen sind. Bereits 2013 ebnete die Änderung der Deponieverordnung diesen Weg (siehe DepV, AbfKlärV).

Die meisten der momentan praktizierten Verwertungswege von Klärschlammverbrennungsaschen oder kohlenstoffhaltigen Rückständen schließen eine Rückholbarkeit der Aschen und damit des Phosphors aus. Diese Verwertungspfade werden laut Novelle der Klärschlammverordnung in Zukunft nur noch möglich sein, wenn der ursprüngliche Phosphorgehalt im Klärschlamm weniger als 20 g/kg Trockensubstanz beträgt (siehe AbfKlärV).

Abbildung 9 verdeutlicht, dass der überwiegende Teil der Aschen bisher auf Deponien verwertet wurde oder in den Bergversatz ging. Ein mit 5 % lediglich geringerer Teil wurde, da er die Anforderungen der Düngemittelverordnung einhält, auf landwirtschaftlichen Flächen als Dünger genutzt [KRÜGER/ADAM].

Abbildung 9

Entsorgungswege der Klärschlammverbrennungsaschen aus Klärschlammmonoverbrennungsanlagen für das Jahr 2014 von 24 Anlagen



Quelle: [KRÜGER/ADAM]

07

Klärschlammanfall, Entsorgung und Verwertung

In Deutschland wurden 2016 etwa 1,77 Mio. t TM Klärschlamm entsorgt. Rund zwei Drittel dieser Menge werden aktuell in Form der Mit- bzw. Mono-verbrennung thermisch behandelt. Lediglich 24 % des gesamten Klärschlammaufkommens wird direkt in der Landwirtschaft stofflich genutzt. Weitere stoffliche Nutzungspfade sind in der landschaftsbau-lichen bzw. in der sonstigen stofflichen Verwertung (z. B. Kompostierung oder Rekultivierungsmaßnahmen) zu finden, die in Summe einen Anteil von etwa 12 % an der gesamten Klärschlamm Entsorgung ausmachen. Eine Deponierung von unbehandelten Klärschlämmen wird seit 2009 in Deutschland nicht mehr angewandt.

Entsprechend der vorliegenden regionalen bzw. lokalen Gegebenheiten weicht die in den einzelnen Bundesländern praktizierte Klärschlamm Entsorgung von diesen bundesdeutschen Mittelwerten teilweise deutlich ab. Tabelle 18 sowie Abbildung 10 geben einen Überblick über die in den Bundesländern angewandten Entsorgungswege.

Bundesländer wie Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen verbrennen über 80 % des in ihrem Bundesland anfallenden Klärschlammes. Eine überwiegende landwirtschaftliche Verwertung des Klärschlammes wird bislang vor allem in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz und Schleswig-Holstein praktiziert. Auffällig ist, dass die beiden Stadtstaaten Berlin und Hamburg ausschließlich thermisch entsorgen, während die landesfreie Hansestadt Bremen mehr als ein Viertel seines Klärschlammaufkommens landwirtschaftlich verwertet.



Tab. 18

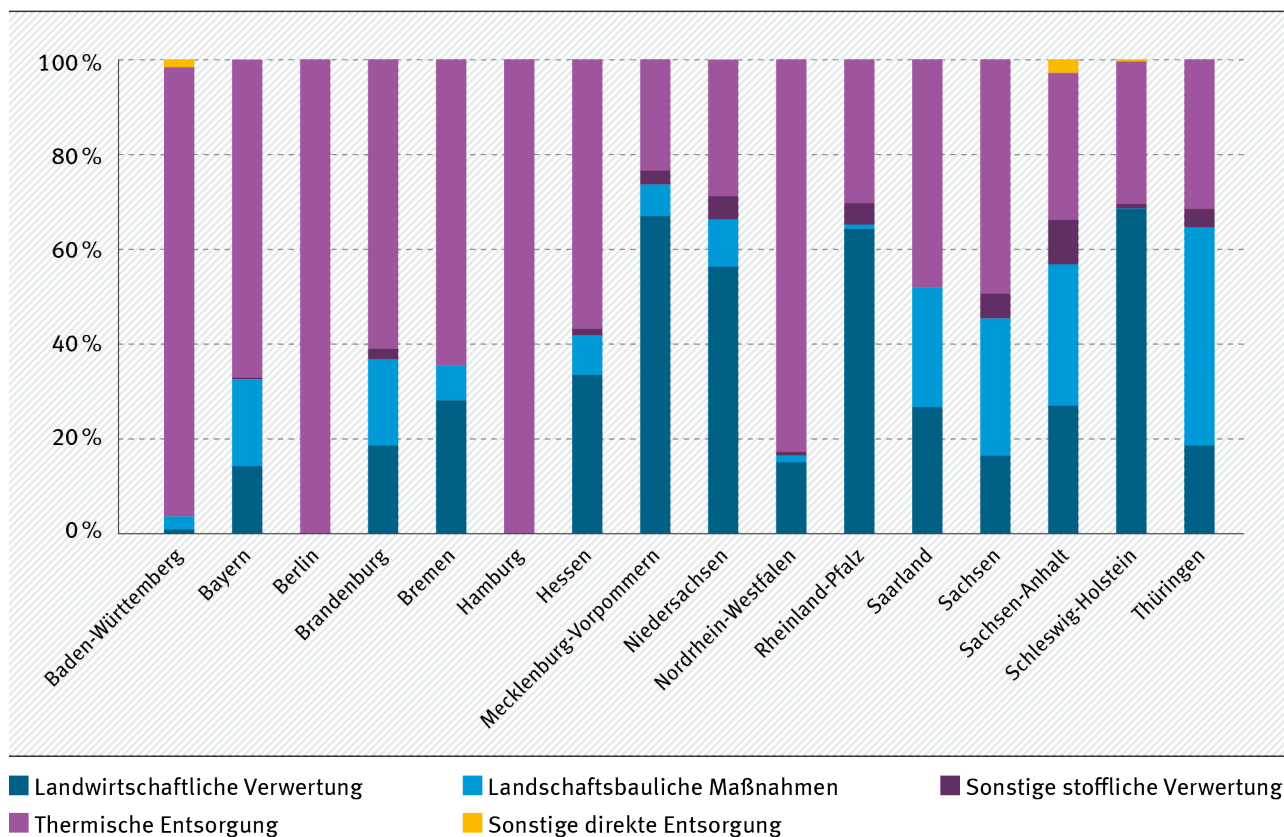
Klärschlamm entsorgungsmengen und Wege 2016, unterschieden nach Bundesländern

Bundesland	Klärschlamm- entsorgung gesamt [t TM/a]	Landwirt- schaftliche Verwertung [t TM/a]	Landschafts- bauliche Maßnahmen [t TM/a]	Sonstige stoffliche Verwertung [t TM/a]	Thermi- sche Be- handlung [t TM/a]	Sonstige direkte Entsorgung [t TM/a]
Baden-Württemberg	223.523	2.032	6.206	36	211.452	3.797
Bayern	290.306	41.387	53.167	1.136	194.304	312
Berlin	50.871	–	–	–	50.871	–
Brandenburg	74.015	13.772	13.413	1.696	45.134	–
Bremen	20.031	5.635	1.478	–	12.918	–
Hamburg	50.619	–	–	–	50.619	–
Hessen	156.282	52.369	12.868	2.369	88.676	–
Mecklenburg-Vorpommern	34.508	23.109	2.286	1.009	8.104	–
Niedersachsen	143.951	80.999	14.410	6.968	41.424	150
Nordrhein-Westfalen	383.341	57.884	5.502	2.818	317.137	–
Rheinland-Pfalz	86.162	55.343	808	3.862	26.149	–
Saarland	19.022	5.089	4.781	–	9.152	–
Sachsen	70.108	11.530	20.266	3.649	34.663	–
Sachsen-Anhalt	57.775	15.625	17.179	5.414	17.889	1.668
Schleswig-Holstein	75.622	51.821	30	693	22.712	366
Thüringen	37.036	6.888	17.045	1.414	11.689	–
Insgesamt	1.773.172	423.483	169.439	31.064	1.142.893	6.293

Quelle: [DESTATIS B]

Abbildung 10

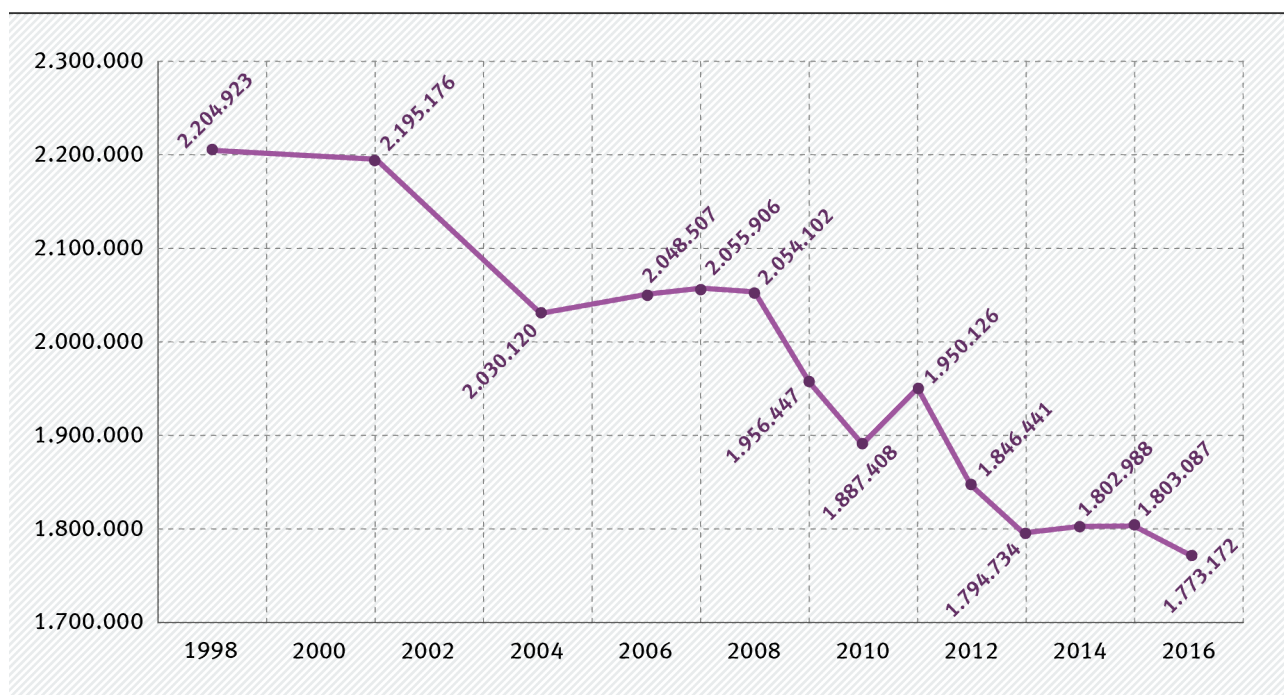
Prozentuale Verteilung der Entsorgungswege in den Bundesländern 2016



Quelle: [DESTATIS B]

Abbildung 11

Entwicklung der Klärschlammmenge in [t TM/a]



* Klärschlammmenge von 1998, 2001 und 2004 berechnete sich aus der statistischen Bundesamt angegebenen Gesamtmenge minus der ebenfalls angegebenen Klärschlammmenge zur Abgabe an andere Abwasserreinigungsanlagen

Quelle: [DESTATIS B - I]



Entwicklung der Klärschlammmenge

1998 wurden etwa 2,2 Mio. t TM Klärschlamm entsorgt. Seitdem hat die Menge des jährlich zu entsorgenden Klärschlammes stetig abgenommen und machte im Jahr 2016 eine Menge von 1,77 Mio. t TM aus. Die Ursachen für die mit knapp 20% recht deutliche Verringerung des zu entsorgenden Aufkommens sind im Zubau und in der Effizienzsteigerung der anaeroben Schlammstabilisierung zu finden. Abbildung 11 verdeutlicht diese Entwicklung.

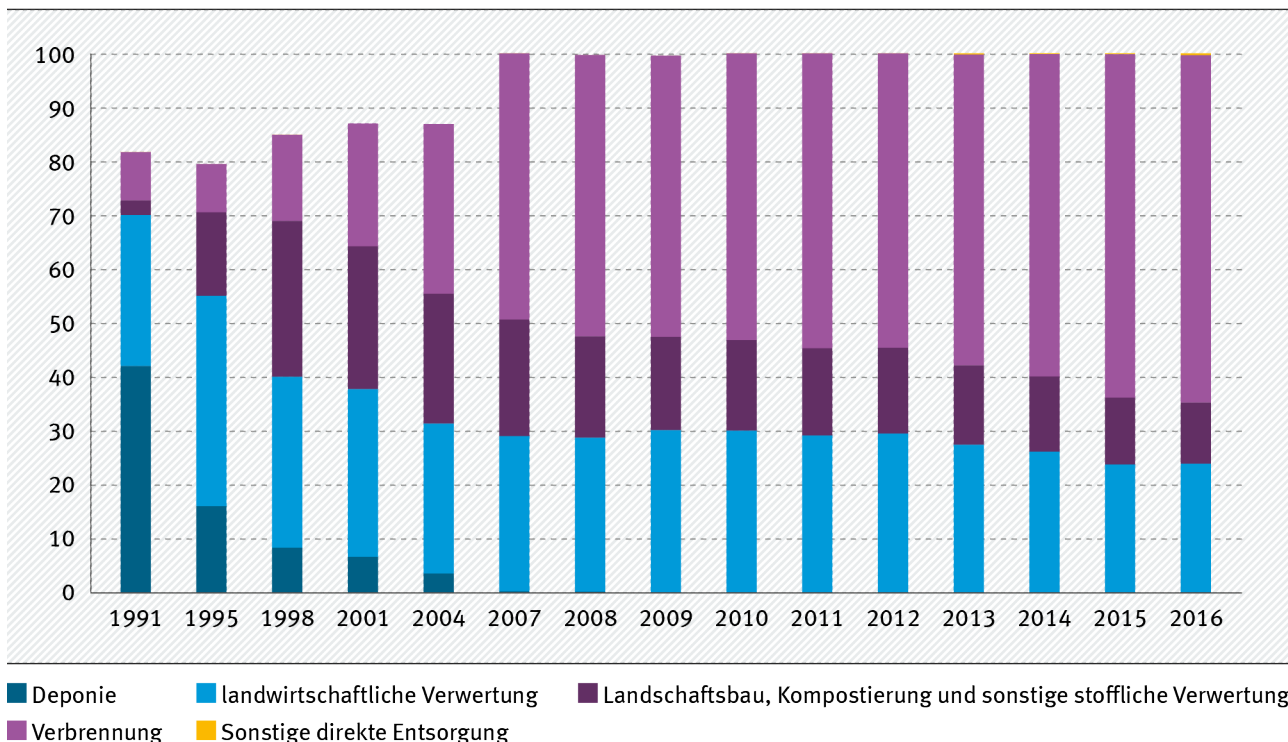
Das Klärschlamm aufkommen wurde aus den Daten des Statistischen Bundesamtes zur Klärschlamm-entsorgung aus der biologischen Abwasserbehandlung entnommen [DESTATIS A, B, C, D, E]. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wurde von der Gesamtmenge für 1998, 2001 und 2004 die Menge an Klärschlamm abgezogen, die an andere Kläranlagen abgegeben wurde. Der Grund dafür ist, dass die nachfolgenden Statistiken diese Menge nicht mehr in der Statistik ausweisen. Ebenfalls taucht die Rubrik „Zwischenlagerung“ nicht mehr in den neueren Statistiken auf.

Zur Veranschaulichung der entsorgten Klärschlamm-mengen und Entsorgungswege über die Jahre hinweg dient Tabelle 19. Hier ist klar die Verschiebung der zu entsorgenden Klärschlamm-mengen von der Deponierung und der landschaftsbaulichen Maßnahmen zur thermischen Behandlung hin zu erkennen.

In Abbildung 12 ist die Entwicklung der verschiedenen Entsorgungswege dargestellt. Die thermische Behandlung von Klärschlamm nahm seit 1991 von 9 auf 64,4% im Jahr 2016 zu. Die Deponierung von Klärschlamm nahm von 42 auf 0% ab. Grund hierfür ist das seit 1. Juni 2005 geltende Deponierungsverbot unbehandelter Abfälle. Ebenfalls abgenommen hat die landschaftsbauliche Verwertung. Wurden 1998 noch 628.550 t TM auf diesem Wege verwertet, so waren es 2016 nur noch 169.439 t TM. Die landwirtschaftliche Verwertung erbrachte bis 2012 mit ca. 30% einen relativ konstanten Beitrag zur Klärschlamm-entsorgung, der jedoch bis zum Jahr 2016 auf einen Anteil von etwa 24% sank. So wurden 2012 noch 544.065 t TM Klärschlamm auf landwirtschaftlichen Flächen ausgebracht, während es 2016 nur noch 423.483 t TM waren.

Abbildung 12

Klärschlamm Entsorgung in den Jahren 1991 bis 2016



Quelle: [DESTATIS B – I]

Tab. 19

Entwicklung der Klärschlammengen und deren Entsorgungswege

Jahr	Klärschlamm- entsorgung (gesamt) t TM	Stoffliche Verwertung						
		Zusammen t TM	in der Landwirtschaft		bei landschaftsbau- lichen Maßnahmen		sonstige stoffl. he Verwertung	
			t TM	%	t TM	%	t TM	%
2016	1.773.172	623.986	423.483	23,9	169.439	9,6	31.064	1,8
2015	1.803.087	651.410	427.736	23,7	190.127	10,5	33.547	1,9
2014	1.802.988	722.416	470.882	26,1	216.148	12	35.386	2
2013	1.794.734	755.731	491.327	27,4	203.712	11,4	60.692	3,4
2012	1.846.441	837.611	544.065	29,5	235.439	12,8	58.107	3,2
2011	1.950.126 ¹⁾	882.695	567.187	29,1	254.402	13	61.106	3,1
2010	1.887.408 ¹⁾	883.659	566.295	30	259.312	13,7	58.052	3,1
2009	1.956.447 ¹⁾	927.516	589.149	30,1	282.455	14,4	55.912	2,9
2008	2.054.102 ²⁾	973.997	587.832	29	331.556	16	54.609	3
2007	2.055.906 ²⁾	1.036.844	592.561	29	368.912	18	75.371	4
2006	2.048.507 ²⁾	1.078.264	611.598	30	399.712	20	66.954	3
2004	2.260.846	1.175.694	627.989	27,8	492.768 ³⁾	21,8	54.937	2,4
2001	2.429.403	1.399.456	754.837	31,1	583.269 ³⁾	–	61.350	2,5
1998	2.459.177	1.490.074	783.662	31,9	628.550 ³⁾	–	77.862	3,2

1) Darin enthalten ist auch die Entsorgung der von anderen Kläranlagen bezogenen Klärschlammmenge, nicht einbezogen ist jedoch die Abgabe an andere Kläranlagen.

2) Ohne Abgabe an andere Kläranlagen

3) Kompostierung und landwirtschaftliche Maßnahmen wurden zusammengefasst

Kapazitäten zur thermischen Behandlung von Klärschlamm

Derzeit werden in Deutschland in Mono- und Mitverbrennungsanlagen insgesamt etwa 1,15 Mio. t Klärschlamm TM pro Jahr eingesetzt [SIX; ITAD und VDZ]. 2016 lag die genutzte Kapazität der Monoverbrennungsanlagen bei etwa 460.500 t TM; die genutzte Kapazität in allen mitverbrennenden Anlagen lag bei rund 568.500 t TM (siehe Tabelle 20). Die vorhandenen Kapazitäten liegen (z. B. durch Ausbau der Einsatzmengen, Nutzung neuer Anlagen) jedoch höher.

Aktuell werden in Kohlekraftwerken etwa 401.000 t TM/a mitverbrannt, wobei die Auslastung genehmigter Mitverbrennungskapazitäten bei etwa 48 % liegt [SIX]. Nach [BURGER et al.] wird die Energiebereitstellung durch Braunkohlekraftwerke von 160 TWh in 2015

bis auf 38 TWh in 2035 absinken und korrelierend dazu die Annahmekapazität für Klärschlämme künftig abnehmen. Zementwerke stellten in den letzten Jahren zunehmend mehr Mitverbrennungskapazität für Klärschlämme zur Verfügung, die sich bezogen auf das Jahr 2004 mehr als verneunfacht hat [VDZ A; VDZ N]. Die Mitverbrennung von Klärschlamm in Abfallverbrennungsanlagen ist bisher auf einem geringen Niveau (unter 3 % der Klärschlammgesamtmenge).

Klärschlammverwertung in den Mitgliedstaaten der EU

In der Europäischen Union fallen im Jahr etwa 9,2 Mio. t TM Klärschlamm an. Tabelle 21 enthält die Mengen der zur Entsorgung anfallenden Klärschlämme in den Mitgliedstaaten der EU und der Schweiz

	Sonstige direkte Entsorgung		Thermische Behandlung		Deponie		Abgabe an andere Abwasserbehandlungsanlagen	Zwischenlagerung
	t TM	%	t TM	%	t TM	%		
	6.293	0,4	1.142.893	64,5	0	0		
	2.998	0,2	1.148.679	63,7	0	0		
	2.642	0,1	1.077.930	59,8	0	0		
	4.232	0,2	1.034.771	57,7	0	0		
	–		1.008.830	54,6	0	0		
	–		1.067.431	54,7	0	0		
	–		1.003.749	53,2	0	0	–	–
	–		1.028.034	52,5	897	0,05	–	–
	–		1.077.624	53	2.481	0,12	–	–
	–		1.015.014	49	4.048	0,2	–	–
	–		965.115	47	5.128	0,25	–	–
	–		711.170	31,5	79.052	3,5	230.726	64.204
	–		554.924	22,8	159.673	6,57	234.227	81.123
	–		395.859	16,1	205.140	8,34	254.254	113.850

Quelle: [DESTATIS B – I]

(absolute Angaben). Die prozentuale Verteilung der praktizierten Entsorgung- bzw. Verwertungswege in den Mitgliedstaaten kann der Abbildung 13 entnommen werden.

Den größten Anteil am Gesamtklärschlammaufkommen in den EU-27 Ländern hat mit 19,7% die Bundesrepublik Deutschland, gefolgt von Spanien (13,2%). Die hohe Bevölkerungszahl und der hohe Anschlussgrad an kommunale Kläranlagen erklären diesen Klärschlamm-anfall. Das Vereinigte Königreich entsorgt ebenfalls eine große Menge an Klärschlamm im Jahr (11,8% des Gesamtaufkommens). Ausgehend von der Annahme, dass der Anschlussgrad der Bevölkerung an kommunale Kläranlagen in der EU steigt, wird auch der zu entsorgende Klärschlamm zunehmen. Dies wiederum stellt die Klärschlamm Entsorgung in der EU vor neue Aufgaben.

Tab. 20

Genutzte Verbrennungskapazitäten in Deutschland 2016

Anlagen	Genutzte Kapazität [t TM]	Anteil am Klärschlamm-gesamtauf-kommen [%]
Kraftwerke gesamt	401.000	23
Klärschlammmonoverbrennungsanlagen	460.410	26
Zementwerke	125.250	7
Abfallverbrennungsanlagen	42.320	3
Klärschlammverbrennung Deutschland gesamt	1.143.000	64,5

114.020 unbekannt

Quelle: [DESTATIS A; SIX; VDZ A; ITAD]

Tab. 21

Klärschlammaufkommen in Europa und deren Verwertungswege

Sortiert nach den einzelnen Mitgliedstaaten nach [Eurostat], Stand 2015

	Aufkommen kt	Deponie %	Landwirt- schaft %	Kompostie- rung %	thermische Behandlung %	Sonstige %
Albanien	92	0	77,32	0	0	22,68
Belgien ¹	107	0	17,24	0	82,76	0
Bosnien und Herzego- wina ³	1	100	0	0	0	0
Bulgarien	47	18,05	64,54	7,22	0	10,19
Dänemark ⁴	115	1,22	64,46	0	29,44	4,88
Deutschland	1.803	0	23,72	12,41	63,71	0,17
Estland ³	19	9,78	1,63	88,59	0	0
Finnland ¹	141	6,86	5,02	65,68	22,43	0
Frankreich ²	937	3,32	44,96	32,56	18,21	0,95
Griechenland ²	119	33,61	19,63	7,75	33,17	5,84
Irland	58	0,17	79,97	18,66	0	1,2
Italien ⁴	954	48,46	33,09	0	3,85	14,6
Kroatien	17	94,35	5,65	0	0	0,01
Lettland ³	21	0,97	36,23	11,11	0	51,69
Litauen	37	0	30,11	41,78	0	28,11
Luxemburg	9	0	34,36	24,12	8,28	33,25
Malta	8	100	0	0	0	0
Niederlande ²	320	0	0	0	100	0
Norwegen	142	15,15	61,73	16,07	0	7,05
Österreich ²	239	1,34	16,58	32,52	49,56	0
Polen	568	7,13	18,93	8,29	13,96	51,69
Portugal ¹	113	10,08	89,83	0	0,09	0
Rumänien	156	66,69	6,81	0	0,32	26,18
Schweden ²	184	1,96	27,72	32,12	1,2	37,01
Schweiz ³	195	0	0	0	96,81	3,19
Serbien	11	100	0	0	0	0
Slowakei	56	8,25	0	44,22	30,07	17,46
Slowenien	29	0,69	0	2,08	52,25	44,98
Spanien ⁴	1.205	14,9	74,56	0	3,9	6,64

	Aufkommen kt	Deponie %	Landwirtschaft %	Kompostierung %	thermische Behandlung %	Sonstige %
Tschechische Republik ³	260	6,8	31,17	53,38	2,27	6,38
Ungarn	111	4,6	8,47	75,45	11,48	0
Vereinigtes Königreich ¹	1.078	0,44	78,3	0	21,23	0,04
Zypern	7	0	13,98	0	0	86,02

1) 2012 Belgien, Finnland, Portugal und Vereinigte Königreich
 2) 2014 Frankreich, Griechenland, Niederlande und Schweden
 3) 2013 Bosnien und Herzegowina, Estland, Lettland, Schweiz und Tschechische Republik
 4) 2010 Dänemark, Spanien und Italien

Abbildung 13

Praktizierte Klärschlammverwertung in Europa (sortiert nach den einzelnen Mitgliedstaaten) Stand 2015



08

Kosten der Klärschlamm Entsorgung

Eine Umstellung der Klärschlammbehandlung und -entsorgung wird sich zumeist auch auf die Kosten auswirken. Die Höhe der Kosten für die Abwasserbehandlung hängt allerdings von vielen Faktoren ab. Diese sind nach [FELS et al.] hauptsächlich:

- ▶ Größe und Ausbaugrad der Kläranlage
- ▶ Saisonale Einflüsse (z. B. durch den Tourismus)
- ▶ Art der Klärschlamm Entsorgung
- ▶ Strukturelle Eigenschaften (z. B. durch Geländeerhebungen)
- ▶ Einwohnerdichte pro Kanalmeter
- ▶ Zuschüsse

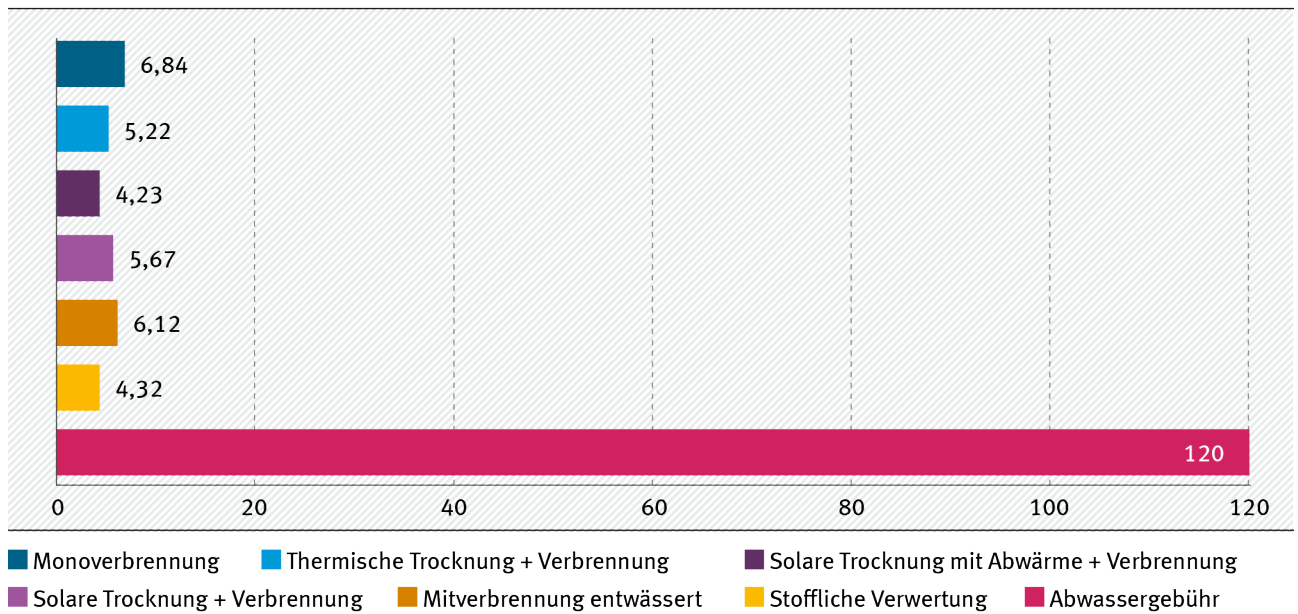
Nach FELS et al. haben besonders die Investitionskosten von Kläranlagen und Kanalnetzen einen sehr langfristigen Einfluss auf die Abwasserbehandlungskosten. Etwa 75 bis 85 % der Kosten sind Fixkosten und unabhängig von der anfallenden Abwassermenge. Der zweitgrößte Posten, der in die Abwasserkosten mit einfließt, sind Abschreibungen und

Zinsen. Personalkosten sind mit etwa 14 % kalkuliert. Weitere 10 % entfallen auf Betriebsmittel und Energie. Somit schlagen die Behandlung und Entsorgung von Klärschlamm lediglich mit 4 % zu Buche, was bedeutet, dass der nachgeschaltete Entsorgungsweg im Vergleich zu den anderen Kosten bisher wenig ins Gewicht fällt. Eine Änderung der Entsorgung hat deshalb zumeist nur geringe Auswirkungen auf die Gesamtkosten und liefert demnach auch nur einen geringen Beitrag zur Erhöhung der Abwassergebühren [FELS et al; JACOBS].

In Abbildung 14 sind auf Basis von angenommenen Vergleichswerten die in Abhängigkeit der spezifischen Behandlungsverfahren resultierenden Entsorgungskosten dargestellt. Eine durchschnittliche Transportentfernung von 150 km, ein Annahmepreis von 40 €/t Klärschlamm Originalsubstanz (OS) und eine mittlere Abwassergebühr von 120 € bzw. ein gemittelter spezifischer Klärschlammfall von 18 kg TR je Einwohner und Jahr wurden dabei u.a.

Abbildung 14

Kosten der Klärschlamm Entsorgung einschließlich der Kosten für Entwässerung und Transport
in Euro pro Tonne TM in Relation zur mittleren Abwassergebühr



Basis = Durchschnittswerte:
Abwasseranfall = 55 m³/EWa
Abwassergebühr = 2,20 €/m³
Klärschlammfall = 18 kg TR/EWa

Quelle: [JACOBS]

zu Grunde gelegt. Für die Ermittlung der Kosten in der Mitverbrennung wurden zusätzlich die durch die Trocknung entstehenden Kosten von 20 bis 25 €/t TR berücksichtigt.

In Abhängigkeit der erreichbaren Durchsatzleistungen und des Nutzungsgrads vorhandener Abwärme bzw. des zu erzielenden Klärschlammanteils in der (Mit)Verbrennung wird die resultierende Kostenstruktur maßgeblich beeinflusst. Der in Abbildung 15 dargestellte detaillierte Kostenvergleich zeigt deutlich, dass vor allem die Trocknungsanlagen einen Kostenvorteil aufweisen, die Abwärme von naheliegenden Biogasanlagen bzw. Kraftwerken einsetzen. Weiterhin ist zu erkennen, dass sich durch Skalierung der Durchsatzleistungen die Trocknungskosten zusätzlich senken lassen.

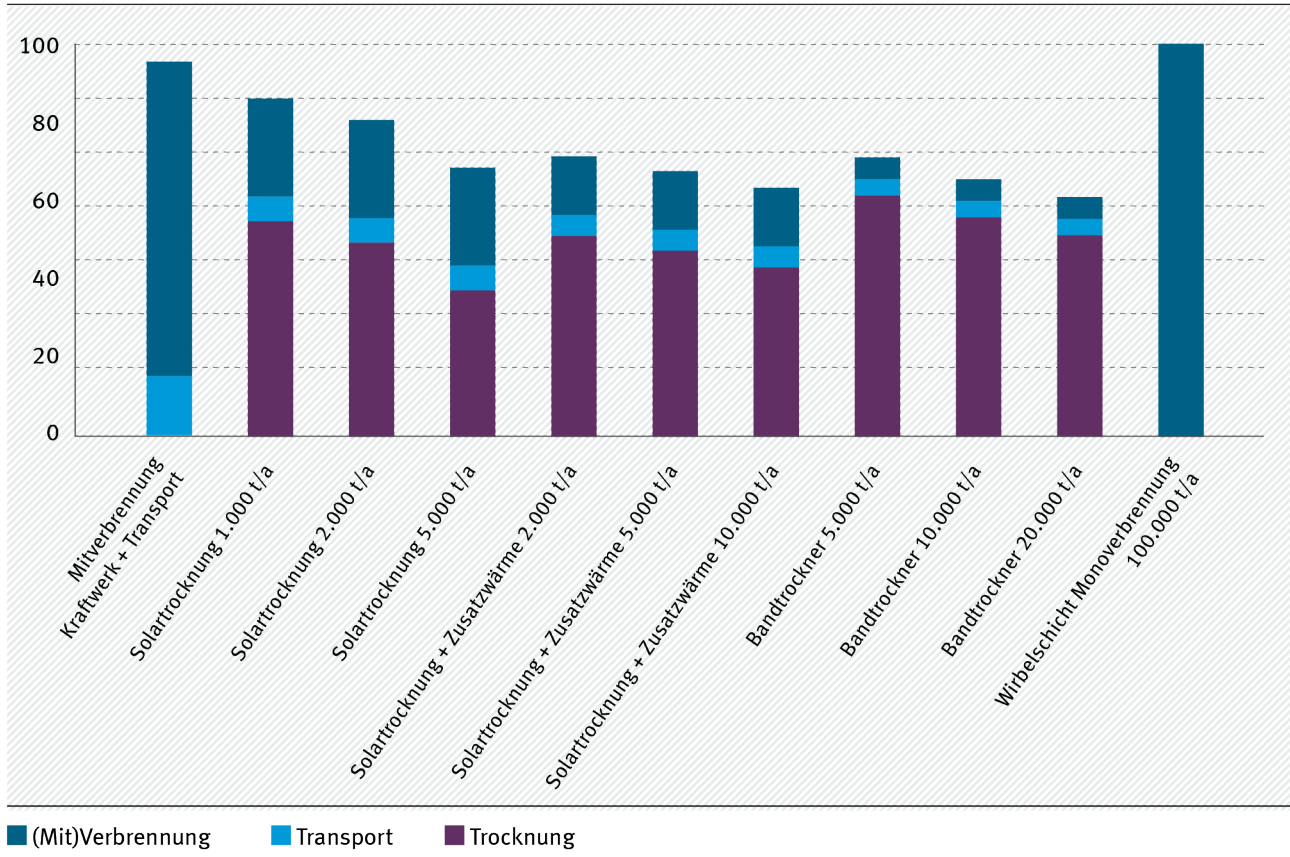
Aus Abbildung 16 geht hervor, dass die stoffliche Verwertung die bislang kostengünstigste Option der Klärschlamm Entsorgung war. Die Kosten der landwirtschaftlichen Klärschlammausbringung betragen zwischen 160 und 320 €/t TR. Regional kann jedoch die bodenbezogene Klärschlammverwertung in Konkurrenz zur Nutzung von Wirtschaftsdüngern stehen, die bei begrenzten Verwertungskapazitäten zu einer Erhöhung der Klärschlamm Entsorgungs-

kosten führen kann (vergl. Kapitel 5). Zur Mitverbrennung in Kraftwerken sind etwa 280 bis 400 €/t zu veranschlagen. Die Monoverbrennung liegt dagegen zwischen 280 und 480 €/t TR. Regionale bzw. lokale Gegebenheiten (Transportentfernungen, Klärschlamm aufkommen, vorhandene Behandlungskapazitäten) können dabei teilweise erhebliche Preisunterschiede innerhalb eines Entsorgungsweges verursachen. Insbesondere in der Nähe von Ballungszentren sind häufig Mitverbrennungskapazitäten gegeben, dagegen sind solche Entsorgungsanlagen im ländlichen Raum nicht in gleichem Maße vorhanden, was letztlich den notwendigen logistischen Aufwand und damit die Transportkosten erhöht.

Die Auswirkungen des Verzichts auf eine bodenbezogene Klärschlammausbringung stellt sich wie folgt dar: Laut der Studie [FELS et al.] entfallen lediglich 4 % der Gesamtkosten der Abwasserbewirtschaftung auf die Entsorgung des Klärschlammes. Der Rest wird durch Abwassertechnik, Zinsen und Abschreibungen verursacht. Im Durchschnitt betragen die Abwasserkosten rund 2,2 € pro Kubikmeter. Die Studie errechnete eine Erhöhung von drei Cent pro Kubikmeter. Für einen Vierpersonenhaushalt würde dies eine Steigerung von 484 auf 491 € pro Jahr bedeuten (rund 7 € pro Jahr). Im Fall von Kläranlagen, bei denen der

Abbildung 15

Vergleich der Kostenstrukturen der Thermischen Klärschlammbehandlung

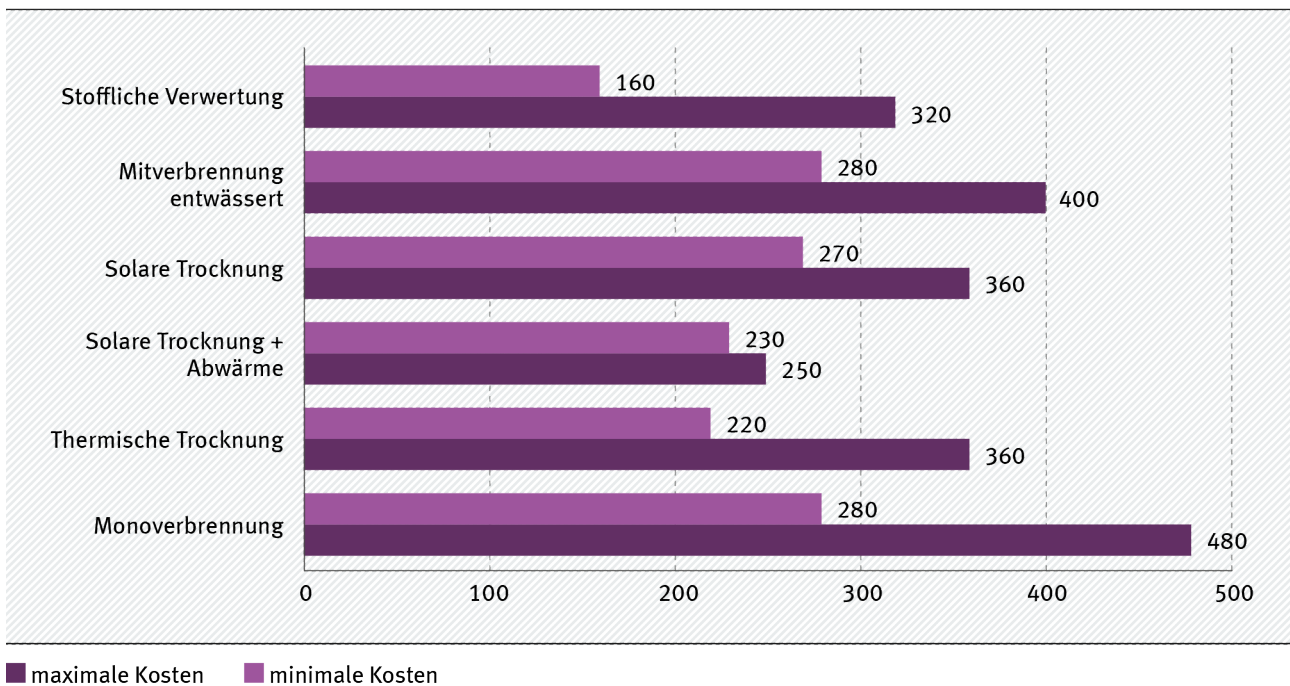


Quelle: [JACOBS]

Abbildung 16

Resultierende Kosten der Klärschlammverwertung

resultierende minimale und maximale Verwertungskosten (€/t TR)



Quelle: [JACOBS]

Klärschlamm nicht entwässert wird, wäre mit einer Erhöhung um vier Cent pro Kubikmeter (gut 8€ pro Jahr) zu rechnen. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Modellrechnungen, deren Ergebnis von den eingesetzten Werten (spezifischer Wasserverbrauch bzw. Abwassergebühr) abhängig ist [FELS et al.].

Mit der novellierten Klärschlammverordnung wird die Phosphorrückgewinnung als weiterer Faktor zu den Kosten der Klärschlamm Entsorgung hinzukommen. Zunächst stellt sich die Frage, ob die Phosphorrückgewinnung überhaupt auf die Abwassergebühren umgelegt werden kann. Laut aktuellem Kenntnisstand ist es möglich, die Kosten, die für die Verfahren der Rückgewinnung zusätzlich anfallen, auf diese um zu legen. Dies würde bedeuten, dass eine Finanzierung auf kommunaler Ebene gesichert wäre [DPP]. Schätzungen ergaben, dass sich die Abwasserentgelte je nach regionalen Rahmenbedingungen um ca. 3 bis 11 € pro Einwohner und Jahr erhöhen könnten. Eine große Rolle wird dabei spielen, welche Wege der Phosphorrückgewinnung auf einer Kläranlage eingeschlagen werden müssen und wie sich die verschiedenen Verfahren langfristig am Markt etablieren. Wäre lediglich eine Behandlung des Klärschlammes z. B. mit einem Fällungsverfahren wie Airprex notwendig, könnten Kosten sogar verringert werden. Diese Verfahren bringen Vorteile (wie Verhinderung von Verkrustungen und damit Schäden durch Struvitbildung, Verbesserung der Schlammwässerbarkeit) mit sich, die die Kosten der Abwasserbehandlung verringern. Verfahren, die z. B. eine Monoverbrennung mit anschließender Phosphorrückgewinnung aus der Asche erfordern, bedeuten in der Regel hohe Investitionskosten. Würden die Klärschlammverbrennungsaschen oder kohlenstoffhaltigen Rückstände nach thermischer Behandlung direkt in den Prozess der Herstellung mineralischer Düngemittel eingebracht, fielen hingegen lediglich Kosten für den Transport der Aschen an.

Der Verzicht auf eine bodenbezogene Verwertung hätte auch weitere Vor- und Nachteile für die verschiedenen Akteure. In einigen Fällen werden erhöhte Transportkosten für Klärschlämme anfallen, da diese anderenorts thermisch behandelt werden müssen. Die Landwirte müssen den bisher als Dünger eingesetzten Klärschlamm ersetzen bzw. Maßnahmen zum Humuserhalt ergreifen. Falls dieser Ersatz durch industriellen Dünger oder Recyclate aus der Phosphorrückgewinnung geleistet wird, entstehen ihm dadurch höhere Kosten. Diesem Kostennachteil steht ein verminderter Schadstoffeintrag in die Böden positiv gegenüber. Darüber hinaus werden die Kosten für die bodenbezogene Verwertung für den Klärschlammherzeuger auch deshalb höher, weil der Klärschlamm immer mehr in Konkurrenz zu Wirtschaftsdüngern wie Gülle steht. Ausbringungsbeschränkungen und Grenzwertverschärfungen (vergl. DüV, DüMV und AbfKlärV, Kapitel 1 und 5) erschweren es zunehmend Abnehmer für den Klärschlamm zu finden. Ein großer Vorteil der Phosphorrückgewinnung ist, dass sowohl die Mineraldünger als auch die Recyclingdünger im Gegensatz zum Klärschlamm eine definierte Zusammensetzung und Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe haben. Erst das macht eine gute bedarfsgerechte Düngepraxis möglich und dies wiederum spart Kosten.

09

Zusammenfassung und Empfehlungen

Klärschlamm ist ein Vielstoffgemisch und kann neben Nährstoffen wie Phosphor, Stickstoff und Kalium sowie humusbildender Organik auch eine Reihe bedenklicher Inhaltsstoffe wie Schwermetalle, organische Rückstände (z. B. Arzneimittelrückstände, hormonell wirksame Stoffe), nanoskalige Stoffe, Mikroplastik und diverse Krankheitserreger enthalten. Diese Abwasserinhaltsstoffe gelangen aus Haushalten, Gewerben und diffusen Quellen (z. B. über verschmutztes Niederschlagswasser) in die Kanalisation und schließlich in den Klärschlamm. Über ihre Umweltrelevanz und -wirkung ist zumeist wenig bekannt. Wird der Klärschlamm thermisch behandelt, also verbrannt, werden viele dieser Stoffe, insbesondere die organischen, zerstört. Durch das Aufbringen von Klärschlamm in oder auf Böden, z. B. als (kostengünstiger) Dünger in der Landwirtschaft, können bedenkliche Klärschlamm-inhaltsstoffe jedoch auf den Boden und damit in die Umwelt gelangen. Trotz der gesetzlichen Regelungen in Klärschlammverordnung und Düngerecht ist ein Übergang einzelner

Stoffe in den Nahrungsmittelkreislauf nicht in jedem Fall vollkommen auszuschließen.

Die landwirtschaftliche Klärschlammverwertung ist immer auch mit einem möglichen Risiko einer Weiterverbreitung von Krankheitserregern und antibiotikaresistenten Bakterien für Menschen, Tiere und Pflanzen verknüpft. Einen konkreten hygienebezogenen Richtwert gibt es aktuell einzig für Salmonellen. Daher werden in der Klärschlammverordnung strenge Ausbringungseinschränkungen für Klärschlämme festgelegt. So ist z. B. die Aufbringung von Klärschlämmen auf Gemüse- und Obstanbauflächen, auf Grünland sowie in Wasser- und Naturschutzgebieten generell nicht zulässig. Auf Ackerflächen, die zum Anbau von Feldgemüse genutzt werden, sind Wartezeiten einzuhalten. Außerdem begrenzen im Düngerecht bedarfsbezogene Ausbringungsreglementierungen für Phosphor und Stickstoff die Menge der zulässigen Klärschlamm-düngung.

Mit der novellierten Klärschlammverordnung, die am 03.10.2017 in Kraft getreten ist, soll nach einer Übergangsfrist bis 01.01.2029 bzw. 01.01.2032 die direkte bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm aus Kläranlagen > 100.000 bzw. > 50.000 EW eingestellt werden. Für kleinere Anlagen bleibt der Weg der landwirtschaftlichen oder landbaulichen Klärschlammverwertung weiterhin offen.

Aufgrund des Vorkommens an bedenklichen Stoffen und Krankheitserregern bewertet das Umweltbundesamt (UBA) unter Vorsorgeaspekten die direkte bodenbezogene Verwertung von Klärschlamm kritisch und spricht sich für einen möglichst weitgehenden Verzicht auf diese Art der Verwertung aus. Ein erster Schritt in diese Richtung ist durch die Vorgaben der neuen Klärschlammverordnung getan.

Mit dem Verzicht auf Klärschlamm Düngung steht die organische Substanz des Klärschlammes dem Boden als Humusbildner nicht mehr zur Verfügung. Zum Ausgleich der fehlenden Humusmenge, bzw. einer ggf. negativen Humusbilanz des Bodens, müssen Ersatzmaßnahmen ergriffen werden, die der guten fachlichen Praxis in der Landwirtschaft nach dem Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG) entsprechen. Das UBA geht davon aus, dass eine intelligente Humusbewirtschaftung (z. B. über Fruchtfolgen-gestaltung) und der stattfindende Ausbau der Bioabfallsammlung und -verwertung dazu beitragen können, die entstehende Lücke zu schließen. Auch Wirtschaftsdünger (wie Gülle, Gärreste) sind nutzbar, wenn sie den gesetzlichen Anforderungen entsprechen. Vielerorts wurde aufgrund des Rückgangs der landwirtschaftlichen Klärschlammausbringung bereits auf alternative Maßnahmen umgestellt.

Der in Deutschland anfallende Klärschlamm bietet ein Rückgewinnungspotential von etwa 50.000 t Phosphor pro Jahr. Mit der Novellierung der Klärschlammverordnung und der verpflichtenden Phosphorrückgewinnung wurde eine rechtliche Grundlage geschaffen, künftig einen beträchtlichen Teil des rückgewinnbaren Potentials technisch zu erschließen.

Die novellierte Klärschlammverordnung schreibt vor, dass künftig bei einem Gehalt von ≥ 20 g Phosphor im Klärschlamm (TM) mindestens 50 % dieses Phosphors auf der Kläranlage zurückgewonnen werden müssen oder der Phosphorgehalt auf unter 20 g/kg abzumindern ist. Wird der Klärschlamm

thermisch behandelt, sind mindestens 80 % des im Verbrennungsrückstand enthaltenen Phosphors zurückzugewinnen. Alternativ ist die Langzeitlagerung der Verbrennungsrückstände oder kohlenstoffhaltigen Rückständen möglich, wenn Vermischung und Verlust des Phosphors ausgeschlossen sind und die spätere Phosphorrückgewinnung bzw. -nutzung gewährleistet bleibt.

Für die Phosphorrückgewinnung kommen entweder abwasserseitige Verfahren (z. B. Fällungsverfahren) in Frage, die eine ausreichende Menge an Phosphor aus dem Klärschlamm bzw. Schlammwasser rücklösen und/oder ausfällen, oder thermische bzw. der thermischen Behandlung nachgeschaltete Verfahren, bei denen die stoffliche Verwertung der Verbrennungsrückstände oder kohlenstoffhaltigen Rückstände zu Düng- oder anderen stofflichen Zwecken möglich ist. Da viele der entwickelten Verfahren entweder zu geringe Rückgewinnungsraten erzielen oder kaum großtechnisch erprobt sind, bedarf es aktuell noch der Weiterentwicklung und Förderung entsprechender Techniken. Aussagen darüber, welche Phosphorrückgewinnungsverfahren sich künftig durchsetzen werden, können bislang nicht getroffen werden, da die Auswahl des geeigneten Verfahrens von vielen Faktoren abhängig ist (z. B. Größe und Betriebsweise der Kläranlage und/oder Verbrennungsanlage, Schwermetallgehalt der Klärschlammasche, regionale Anbindung der Kläranlage an Verbrennungsanlagen, Transportkosten, Preisentwicklung des Phosphors auf dem Weltmarkt etc.).

Zur thermischen Behandlung der Klärschlamm-mengen, die aufgrund der neuen Gesetzeslage künftig nicht mehr bodenbezogen verwertet werden dürfen, bedarf es weiterer Kapazitäten, d.h. zusätzlicher Verbrennungsanlagen. Der Ausbau dieser Kapazitäten, findet derzeit bereits statt. Bei der Mitverbrennung von Klärschlamm z. B. in Zementwerken, Kohlekraftwerken oder Abfallverbrennungsanlagen können zwar fossile Brennstoffe eingespart werden, wertvoller Phosphor wird aber aktuell noch dem Kreislauf entzogen, da in der Regel noch keine vorherige Phosphorrückgewinnung aus dem Klärschlamm erfolgt. Entweder ist der Phosphor fest im Produkt eingebunden oder so stark in Schlacken und anderen Verbrennungsrückständen verdünnt, dass er mit wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nicht mehr zurückgewonnen werden kann. Daher ist eine Mitverbrennung von Klärschlamm gemäß Klärschlamm-

verordnung künftig nur dann zugelassen, wenn der Phosphor im Klärschlamm einen Gehalt von weniger als 20 g/kg TM aufweist bzw. zuvor dem Klärschlamm mittels Einsatz geeigneter Techniken entzogen wurde oder kein Verdünnungseffekt des Phosphors in den Verbrennungsrückständen erfolgt. Letzteres ist z. B. bei der thermischen Behandlung von Klärschlamm mit aschearmen Kohlen möglich. Wird Klärschlamm ohne Verdünnungseffekt oder separat, d.h. in sogenannten Monoverbrennungsanlagen behandelt, muss die Rückgewinnung aus oder die stoffliche Nutzung der Asche gewährleistet sein.

Laut aktuellem Kenntnisstand kann die Finanzierung der Phosphorrückgewinnung auf Kläranlagen auf die Abwassergebühr umgelegt werden [DPP]. Damit ist eine Finanzierung auf kommunaler Ebene gesichert. Es wird geschätzt, dass sich die zu erwartenden Mehrkosten für Verbraucher bei Umstellung von der landwirtschaftlichen Verwertung auf die thermische Behandlung in Verbindung mit einer Phosphorrückgewinnung, die Abwasserentgelte nur geringfügig erhöhen (ca. 3–11 € pro Einwohner im Jahr).

Die Umstellung von der direkten bodenbezogenen Verwertung hin zu einer thermischen Klärschlammbehandlung mit vor- oder nachgeschalteter Phosphorrückgewinnung bringt, neben der Vermeidung von möglichen hygienischen und stofflichen Risiken für Böden und Umwelt sowie der Möglichkeit des Nährstoffrecyclings, weitere Vorteile mit sich. Mit Blick darauf, dass sich die Eigenschaften von Rohphosphaten in der Zukunft qualitativ weiter verschlechtern und aufgrund höheren globalen Bedarfes im Preis steigen können, hat die Umsetzung der Phosphorrückgewinnung den Vorteil, dass Deutschland ein Stück weit unabhängiger vom Import an mineralischen Phosphaten wird. Darüber hinaus eröffnet die Umstellung einen neuen Markt und es können positive Auswirkungen auf den Technologietransfer erwartet werden. Mit den Rückgewinnungsanlagen und Verbrennungskapazitäten würden darüber hinaus auch Arbeitsplätze geschaffen.



Für eine erfolgreiche Umsetzung der Anforderungen der novellierten Klärschlammverordnung sowie zur Berücksichtigung darüber hinausgehender zukünftiger Entwicklungen sind nach Ansicht des UBA folgende Maßnahmen erforderlich:

- ▶ Die Schadstoffgrenzwerte in Klärschlamm- (AbfKlärV) und Düngemittelverordnung (DüMV) sollten bis zu einem vollständigen Ausstieg aus der bodenbezogenen Klärschlammverwertung weiterhin fortgeschrieben werden. Darüber hinaus gilt es zu überprüfen, ob aus Sicht des vorsorgenden Boden- und Gesundheitsschutzes bislang nicht erfasste Schadstoffe (z. B. Medikamentenrückstände) mittelfristig durch Grenzwerte geregelt werden müssen.
 - ▶ Umsetzung einer wirksamen Ausschleusung von Schadstoffen aus dem Klärschlamm wie z. B. über die Abkopplung von Einleitern mit hohen Gesundheitsrisiken wie Krankenhäusern vom kommunalen Abwassersystem.
 - ▶ Die hygienischen Anforderungen an Klärschlamm, der noch auf landwirtschaftlichen Flächen oder bei landschaftsbaulichen Maßnahmen verwertet werden darf, sollten weiterhin überprüft und erforderlichenfalls angepasst werden. Hierbei könnte ein nicht auszuschließendes Risiko einer Ausbreitung von Krankheitserregern und Antibiotikaresistenzen durch eine weitergehende Klärschlammbehandlung (Hygienisierungsmaßnahmen) minimiert werden.
 - ▶ Bei der Abwasserbehandlung sollte weitestgehend eine Umstellung auf Verfahren, die eine Phosphorrückgewinnung unterstützen, erfolgen (z. B. Umstellung auf eine biologische Phosphorelimination und Reduzierung der Eisen-Fällung, da schlechte Nährstoffverfügbarkeit des Recyclats).
 - ▶ Die (Mono)Verbrennungskapazitäten sollten weiterhin sinnvoll ausgebaut werden. Dabei sollten Konzepte entwickelt werden, die sowohl die Phosphorrückgewinnung als auch Aspekte der Energieeffizienz (Infrastruktur, Transportwege, Abwärmenutzung u.Ä.) berücksichtigen.
 - ▶ Eine Mitverbrennung von Klärschlämmen in Kohlekraft- und Zementwerken sowie in Abfallverbrennungsanlagen sollte, wenn zuvor der Phosphorgehalt ausreichend abgereichert werden konnte oder für phosphorarme Klärschlämme, weiterhin genutzt und der Entwicklung künftig verfügbarer Kapazitäten angepasst werden.
 - ▶ Die neuen Anforderungen verursachen zumeist vermehrte Aufwendungen für Entwässerung, Trocknung und Transport des Klärschlammes. Daher sollten energetisch effektive und kostengünstige Konzepte zur Klärschlamm-trocknung (z. B. Trocknung am Standort der Verbrennungsanlage, zum Beispiel mittels Abwärmenutzung) bevorzugt realisiert werden.
 - ▶ Die (Weiter)Entwicklung und insbesondere die großtechnische Umsetzung von aussichtsreichen Phosphorrückgewinnungsverfahren sollte weiterhin, z. B. durch finanzielle Unterstützung aus Förderprogrammen, unterstützt werden.
 - ▶ Bei der Entwicklung von Phosphorrückgewinnungsverfahren mit dem Ziel der direkten Nutzung des Recyclats als Düngemittel, sollte auf eine ausreichende Nährstoffverfügbarkeit (Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors) sowie Schadstoffreduzierung hingewirkt werden.
 - ▶ Den neuartigen Düngemitteln aus oder mit zurückgewonnenem Phosphor muss bei guter Qualität der Zugang zum Markt erleichtert werden (z. B. Ende der Abfalleigenschaften).
 - ▶ Die rechtlichen Anforderungen sollten sukzessive fortgeschrieben werden, um einen hohen Anteil an rückgewonnenem Phosphor aus relevanten Stoffströmen zu sichern und langfristig einen vollständigen Ausstieg aus der bodenbezogenen Verwertung zu ermöglichen.
- Nur durch das Zusammenwirken der genannten Maßnahmen lässt sich das Ziel einer umweltverträglichen Entsorgung von Klärschlamm gewährleisten und eine unabhängige und ressourcenschonende Phosphorrückgewinnung und -verwendung verwirklichen.

Verzeichnisse und Anhänge

- ▶ Abbildungsverzeichnis
- ▶ Tabellenverzeichnis
- ▶ Abkürzungsverzeichnis
- ▶ Danksagung
- ▶ Literaturverzeichnis
- ▶ Anhang I
- ▶ Anhang II
- ▶ Anhang III

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Schlammanfall in Abhängigkeit von der Behandlungsstufe
Abbildung 2	Künftige Pflichten zur Phosphorrückgewinnung gemäß novellierter Klärschlammverordnung
Abbildung 3	Künftig mögliche Entsorgungs- und Verwertungswege für Klärschlamm aus Kläranlagen über 50.000 EW (ab 2032)
Abbildung 4	Massenreduktion durch Entwässerung und Trocknung
Abbildung 5	Zusammenhang zwischen erreichbarem Heizwert und des Wassergehaltes der Klärschlämme
Abbildung 6	Anzahl der Klärschlamm Trockner aufgeteilt nach Trocknerart
Abbildung 7	Leistungsbereiche der Trocknerarten und mittlerer Klärschlamm durchsatz
Abbildung 8	Globale Verteilung der erkundeten Reserven von Rohphosphat für 2016
Abbildung 9	Entsorgungswege der Klärschlammverbrennungsaschen aus Klärschlammmonoverbrennungsanlagen für das Jahr 2014 von 24 Anlagen
Abbildung 10	Prozentuale Verteilung der Entsorgungswege in den Bundesländern 2016
Abbildung 11	Entwicklung der Klärschlammmenge
Abbildung 12	Klärschlamm Entsorgung in den Jahren 1991 bis 2016
Abbildung 13	Praktizierte Klärschlammverwertung in Europa (sortiert nach den einzelnen Mitgliedstaaten) Stand 2015
Abbildung 14	Kosten der Klärschlamm Entsorgung einschließlich der Kosten für Entwässerung und Transport in Euro pro Tonne TM in Relation zur Abwassergebühr
Abbildung 15	Vergleich der Kostenstrukturen der thermischen Klärschlammbehandlung
Abbildung 16	Resultierende Kosten der Klärschlammverwertung
Abbildung 17	Schwermetallkonzentrationen von Cadmium und Quecksilber im Zeitraum von 1977 bis 2015
Abbildung 18	Schwermetallkonzentrationen von Chrom, Kupfer und Zink im Zeitraum von 1977 bis 2015
Abbildung 19	Schwermetallkonzentrationen von Nickel und Blei im Zeitraum von 1977 bis 2015
Abbildung 20	Schadstoffkonzentrationen von PCB (Summe) und PCDD/F im Zeitraum von 1977 bis 2015
Abbildung 21	Schadstoffkonzentrationen von AOX im Zeitraum von 1977 bis 2015

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Schlammkennwerte und ihre Bedeutung
Tabelle 2	Zusammensetzung des Klärschlammes nach DWA und Oliva
Tabelle 3	Konzentration von sieben Schwermetallen, sowie von Stickstoff und Phosphor im landwirtschaftlich genutzten Klärschlamm in Deutschland zwischen 1977 und 2015
Tabelle 4	Konzentration an organischen Verbindungen im Klärschlamm aus Nordrhein-Westfalen nach Fragemann/Barowski
Tabelle 5	Chemische/physikalische/thermische Stabilisierungsverfahren zur Hygienisierung von Klärschlamm
Tabelle 6	Eingesetzte Wärmedien, Temperatur- und Druckbereiche sowie die dazugehörigen Trocknungsaggregate
Tabelle 7	Entwicklung der installierten Trocknungsanlagen und Durchsatzmengen
Tabelle 8	Vergleich der Feuerungssysteme
Tabelle 9	Mitverbrennung in Kohlekraftwerken
Tabelle 10	Verbrannte Klärschlammmenge in Zementwerken von 2004 bis 2016
Tabelle 11	Alte und neue Grenzwerte gemäß Klärschlammverordnung, Düngeverordnung, die fett markierten Werte gelten aktuell für Klärschlamm
Tabelle 12	Vor- und Nachteile der bodenbezogenen Verwertung von Klärschlamm
Tabelle 13	Theoretische Phosphor-Recyclingpotentiale verschiedener Stoffströme in Deutschland
Tabelle 14	Überblick über entwickelte Verfahren zur Phosphorrückgewinnung aus Abwasser, Klärschlamm und Klärschlamm asche
Tabelle 15	In Deutschland realisierte bzw. konkret geplante großtechnische Anlagen
Tabelle 16	Vergleich nasschemischer und thermischer bzw. den thermischen nachgeschaltete Verfahren
Tabelle 17	Vor- und Nachteile der momentanen Klärschlammverwertungswege
Tabelle 18	Klärschlamm Entsorgungsmengen und -wege 2016, unterschieden nach Bundesländern
Tabelle 19	Entwicklung der Klärschlamm Mengen und deren Entsorgungswege
Tabelle 20	Genutzte Verbrennungskapazitäten in Deutschland
Tabelle 21	Klärschlamm aufkommen in Europa und deren Verwertungswege (sortiert nach den einzelnen Mitgliedstaaten nach Eurostat (Stand 2015))
Tabelle 22	Technische Daten der Klärschlammmonoverbrennungsanlagen für kommunalen Klärschlamm (Stand 2012), Anhang I
Tabelle 23	Technische Daten der betriebseigenen Klärschlammverbrennungsanlagen (Stand 2012), Anhang I
Tabelle 24	Anlagendaten der Abfallverbrennungsanlagen, die Klärschlamm mitverbrennen (Stand 2016), Anhang I
Tabelle 25	Technische Daten der Klärschlamm Trocknungsanlagen in Deutschland, Anhang III

Abkürzungsverzeichnis

Gesetze/Verordnungen

AbfKlärV	Klärschlammverordnung
BBodSchV	Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
KrWG	Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz
DepV	Deponieverordnung
DüMV	Düngemittelverordnung
DüngG	Düngegesetz
DüV	Düngeverordnung
17. BImSchV	17. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
TA-Luft	Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft
TA-Si	Technische Anleitung Siedlungsabfall

Behörden/Institute

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.
EFSA	European Food Safety Authority
DPP	Deutsche Phosphor Plattform
EC	Europäische Kommission
EG	Europäische Gemeinschaft
EU	Europäische Union
EU-27	27 Mitgliedsländer der Europäischen Union
EPA	United States Environmental Protection Agency
FAO	Food and Agriculture Organization
HELCOM	Baltic Marine environment Protection commission – Helsinki Commission
GTK	Geological Survey of Finland
ITAD	Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
IWA	Institut für Wassergüte
IWW	Rheinisch-Westfälisches Institut für Wasserforschung gemeinnützige GmbH
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
OECD	Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
SRU	Sachverständigenrat für Umweltfragen
UBA	Umweltbundesamt
USGS	United States Geological Survey
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke

Chemische Verbindungen/Elemente

As	Arsen
AOX	Adsorbierbare organische Halogenverbindungen
B(a)P	Benzo(a)pyren
C	Kohlenstoff
Ca	Calcium
Ca(OH) ₂	Calciumhydroxid
Cd	Cadmium
Cl	Chlor
Co	Kobalt
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cr(VI)	Chrom(VI)
Cu	Kupfer
DEHP	Di(2-Ethyl-Hexyl)phthalat
Fe	Eisen
F	Fluor
H	Wasserstoff
Hg	Quecksilber
H ₂ O	Wasser
K	Kalium
K ₂ O	Kaliumoxid
LAS	Lineare Alkylbenzo-Sulfonate
MAP	Magnesium-Ammonium-Phosphat
Mg	Magnesium
MgNH ₄ PO ₄	Magnesiumammoniumphosphat
MKW	Mineralölkohlenwasserstoff
Mn	Mangan
N	Stickstoff
Na	Natrium
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
P	Phosphor
PAK	Polyzyklische Aromatische Kohlenwasserstoffe
Pb	Blei
PFT	Perfluorierte Tenside
PCB	Polychlorierte Biphenyle
PCDD/PCDF	Polychlorierte Dibenzodioxine/-Furane
P ₂ O ₅	Phosphorpentoxid
S	Schwefel
Sb	Antimon
Se	Selen

Sn	Zinn
Th	Thallium
TBT	Tributylzinn
Zn	Zink
V	Vanadium

Parameter

FM	Feuchtmasse
GR	Glührückstand [%]
GV	Glühverlust [%]
Hu	unterer Heizwert [kJ/kg, MJ/kg]
pH	pH-Wert [-]
TEQ/TE	Toxizitätsäquivalente [-]
TM	Trockenmasse [mg, g, kg]
TOC	Gesamter organischer Kohlenstoff [%; mg/l; mg/m ³]
TR	Trockenrückstand [%]
TS	Trockensubstanz [mg, g, kg]
TS _R	Trockensubstanzgehalt [kg/m ³ , g/L]
WG	Wassergehalt [%]

Einheiten

a	Jahr
d	Tag
€	Euro
ha	Hektar (10.000 m ²)
kg	Kilogramm (10 ³ g)
kJ	Kilojoule (10 ³ Joule)
kt	Kilotonne (10 ⁹ g)
l	Liter
m ³	Kubikmeter
MJ	Megajoule (10 ⁶ Joule)
µg	Mikrogramm (10 ⁻⁶ g)
mg	Milligramm (10 ⁻³ g)
nm	Nanometer (10 ⁻⁹ m)
t	Tonne (10 ⁶ g)
%	Prozent

Weitere Abkürzungen

ATS	Aerob-thermophile Schlammstabilisierung
BHKW	Blockheizkraftwerk
EAggEC	Enteroaggregative Escherichia coli
EHEC	Enterohämorrhagische Escherichia coli
EW	Einwohnerwert
HTC	Hydrothermale Carbonisierung

Danksagung

» Wir danken besonders allen Betreibern, die uns ihre Anlagendaten zur Verfügung gestellt haben und der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) für ihre Unterstützung.

Darüber hinaus möchten wir uns bei Herrn Jacobs von der Klärschlamm-Kooperation Mecklenburg-Vorpommern GmbH und Herrn Dr. Six von der Dr. Six Unternehmensberatung für die freundliche Mitarbeit bedanken. «

Literaturverzeichnis

- [17. **BImSchV**] Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung und die Mitverbrennung von Abfällen – 17. BImSchV); BGBl. I S. 1021, 1044, 3754; Bonn, 02.05.2013
- [**ABD EL-SAMIE**] Abd El-Samie IMF: Phosphordüngewirkung von Klärschlämmen aus Klärwerken mit Phosphatelimination durch Eisensalze. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen
- [**ABFKLÄRV**] Verordnung zur Neuordnung der Klärschlammverwertung (Klärschlammverordnung – AbfKlärV); BGBl. I S. 3465, Bonn, 27.09.2017
- [**BBODSCHV**] Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV); BGBl. I S. 3465, Bonn, 12.07.1999, Zuletzt geändert durch Art. 3 Abs. 4 V v. 27.09.2017
- [**BERGMANN et al.**] Bergmann, A.; Fohrmann, R.; Weber F.A.; et al.: Zusammenstellung von Monitoringdaten zu Umweltkonzentrationen von Arzneimitteln. Gutachten im Auftrag des Umweltbundesamtes FKZ 360 14 013; 2010
- [**BISCHOFBERGER et al.**] Bischofsberger, W.; Dichtl, N.; Rosenwinkel, K.-H.; et al: Anaerobtechnik, 2. Auflage; Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 2005
- [**BMU**] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit; Klärschlammverordnung (AbfKlärV) – Zweiter Arbeitsentwurf für eine Novelle der Klärschlammverordnung vom 20.08.2010; Online abgerufen am/unter: 12.02.2011 <http://www.bmu.de/abfallwirtschaft/downloads/doc/46373.php>
- [**BMUB**] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Klärschlammverwertung in der Landwirtschaft; Internetseite; Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <http://www.bmub.bund.de/themen/wasser-abfall-boden/abfallwirtschaft/statistiken/klaerschlamm/>
- [**BÖRNER et al.**] Untersuchung möglicher Umweltauswirkungen bei der Entsorgung nanomaterialhaltiger Abfälle in Abfallbehandlungsanlagen. Forschungsvorhaben des Umweltforschungsplans FKZ 3712 33 327. Abschlussbericht 2016
- [**BOUBELA et al.**] Boubela, G.; Wurst, F.; Prey, T., et al: Materialien zur Thermischen Behandlung und Verwertung von Abfällen und Reststoffen in der Zellstoff-, Papier-, Span- und Faserplattenindustrie. Wien, Umweltbundesamt 2004
- [**BOXALL et al.**] Boxall, A. B. A.; Kolpin, D. W.; Halling-Sörensen, B.; Tolls, J. (2003): Are veterinary medicines causing environmental risks? Environ. Sci. Technol. 37 (15), 286A-294A.
- [**BRANDT**] Brandt, Simone; Nutzung von Klärschlamm als Rohstoffquelle – Aktueller Stand in Deutschland und in der Europäischen Union sowie Perspektiven für die Zukunft; Masterarbeit, 23. Februar 2011; Berlin http://www.andrakar.com/brandt/Rohstoffquelle_Klaerschlamm_Perspektiven_Br0211.pdf
- [**BURGER et al.**] Burger, A.; Lünenbürger, B.; Pfeiffer, D. et al.: Klimabeitrag für Kohlekraftwerke – Wie wirkt er auf Stromerzeugung, Arbeitsplätze und Umwelt? Position, Umweltbundesamt, April 2015, Dessau-Roßlau
- [**CORDELL et al.**] Cordell D., White S., Lindström T.: Peak phosphorus: the crunch time for humanity, The Sustainable Review, 2011
- [**DEPV**] Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung – DepV); BGBl. I S. 900, Bonn, 27.04.2009, Zuletzt geändert durch Art. 2 V v. 27.9.2017
- [**DESTATIS A**] DESATIS: Düngemittelversorgung, Fachserie 4, Reihe 8.2., Wirtschaftsjahr 2016/2017. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Fachstatistik/DuengemittelversorgungJ.html>
- [**DESTATIS B**] Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlammentsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2016. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammverwertungsart.html>
- [**DESTATIS C**] Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlammentsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2015. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammverwertungsart.html>
- [**DESTATIS D**] Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlammentsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2014. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammverwertungsart.html>
- [**DESTATIS E**] Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlammentsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2013. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammverwertungsart.html>
- [**DESTATIS F**] Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlammentsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2012. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammverwertungsart.html>
- [**DESTATIS G**] Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlammentsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2011. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammverwertungsart.html>
- [**DESTATIS H**] Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlammentsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2010. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammverwertungsart.html>

- [DESTATIS I]** Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2009. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammmverwertungsart.html>
- [DESTATIS J]** Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2008. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammmverwertungsart.html>
- [DESTATIS K]** Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2007. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammmverwertungsart.html>
- [DESTATIS L]** Destatis: Wasserwirtschaft: Klärschlamm Entsorgung aus der öffentlichen Abwasserbehandlung 2006. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Umwelt/UmweltstatistischeErhebungen/Wasserwirtschaft/Tabellen/TabellenKlaerschlammmverwertungsart.html>
- [DPP]** Deutsche Phosphor Plattform (DPP): PRESSEMITTEILUNG zur Gebührenfinanzierung der Phosphorrückgewinnung: online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.deutsche-phosphor-plattform.de/pressemitteilung-zur-gebuehrenfinanzierung-der-phosphorrueckgewinnung/>
- [DÜMV]** Verordnung über das Inverkehrbringen von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln (Düngemittelverordnung – DüMV); BGBl. I S. 54, 136, Bonn, 2012, Zuletzt geändert durch Art. 3 V v. 26.05.2017
- [DÜGG]** Düngegesetz (DüNG): BGBl. I S. 54, 136; Bonn, 09.01.2009, Zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 5.5.2017
- [DÜV]** Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung – DüV); BGBl. I S. 1305, Bonn, 26.05.2017
- [DWA 379]** Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; Merkblatt DWA-M 379 Klärschlamm Trocknung; Hennef, 2004
- [DWA 387]** Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V.; Merkblatt DWA-M 387 Thermische Behandlung von Klärschlämmen: Mitverbrennung; Hennef, 2012
- [EBERT et al.]** Ebert, I.; Amato, R.; Hein, A. et al: Arzneimittel in der Umwelt – vermeiden, reduzieren, überwachen. Umweltbundesamt Fachgebiet IV 2.2 Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel. Berlin, Umweltbundesamt 2014
- [EC]** Europäische Kommission: Große Herausforderung für die Industrie der EU: 20 kritische Rohstoffe: abgerufen am/unter: 14.02.2018 http://europa.eu/rapid/press-release_IP-14-599_de.htm
- [EG]** Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
- [ESSEL et al.]** Essel, R.; Engel, L.; Carus, M.; et al.: Quellen für Mikroplastik mit Relevanz für den Meeresschutz in Deutschland: Umweltbundesamt 2015
- [EU]** Empfehlung der Kommission vom 18. Oktober 2011
- [EUROSTAT]** Gesamtklärschlamm aufkommen aus der öffentlichen Abwasserbehandlung. Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <http://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&init=1&language=de&pcode=ten00030&plugin=1>
- [EWG 86]** Richtlinie 86/278/EWG des Rates vom 12. Juni 1986 über den Schutz der Umwelt und insbesondere der Böden bei der Verwendung von Klärschlamm in der Landwirtschaft
- [EWG 91]** Richtlinie 91/692/EWG des Rates vom 23.12.1991 zur Vereinheitlichung und zweckmäßigen Gestaltung der Berichte über die Durchführung bestimmter Umweltschutzrichtlinien
- [FAO]** Food and agriculture organization of the united nations (2015): World fertilizer trends and Outlook to 2018
- [FELBER/FISCHER]** Felber H., Fischer M.: Klärwärter-Taschenbuch. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. 16. Auflage 2010. 2. F. Hirthammer Verlag München/Oberhaching
- [FELS et al.]** Fels, T. et al: Ermittlung der Kosten, die mit einem Ausstieg/Teilausstieg aus der landwirtschaftlichen Klärschlammverwertung verbunden wären; Studie für das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Landwirtschaft des Landes Schleswig-Holstein; witra-kiel GbR; Universität Kiel; 2005
- [FRAGEMANN/BARKOWSKI]** Fragemann H.-J., Barkowski, D.; Klärschlamm Belastungen mit organischen Schadstoffen – Ergebnisse der landesweiten Untersuchungen in Nordrhein-Westfalen; Vortrag auf Expertentagung in Bonn am 6. Dezember 2006
- [FÜHRACKER/BURSCHE]** Führacker M., Bursche W.: Schadstoffe im Klärschlamm Klärschlammbehandlung heute und morgen, 21.11. – 22.11.2007, Messegelände WELS, 2007
- [GOLET et al.]** Golet, E. M.; Xifra, I.; Siegrist, H.; Alder, A. C. und W. Giger: Environmental Exposure of Fluorquinolone Antibacterial Agents from Sewage to Soil. Environmental Science & Technology Vol. 37, No. 15, p. 3243-3249
- [GROTE et al.]** Grote, M.; Didem, H. Y.; Michel, R.; et al.: Antibiotikaspuren im Getreide? – Analytik, Befunde, Bewertung. Vortrag 59. Tagung der Getreidechemie 18. – 19.06.2008
- [GTK]** Geological Survey of Finland, abgerufen am/unter 12.02.2018: <http://verkkolehti.geofoorumi.fi/en/2015/10/finlands-phosphorus-resources-are-more-important-than-ever/>
- [GUJER]** Gujer W.: Siedlungswirtschaft; Institut für Umweltingenieurwissenschaften ETH Zürich, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1999, 2002 und 2007
- [HELCOM]** HELCOM Recommendation 38/1: SEWAGE SLUDGE HANDLING, Helsinki, 01.03.2017
- [IMS]** IMS Health (2013): MIDAS database. Frankfurt/ Main Germany in: Umweltbundesamt (2014): Arzneimittel in der Umwelt – vermeiden, reduzieren, überwachen. Umweltbundesamt Fachgebiet IV 2.2 Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel. Stand April 2014
- [IWA – TU-Wien]** IWA – TU-Wien – Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft (2008): Klärschlammverwertung. Wien, 2008

- [ITAD]** Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. (ITAD): Mitverbrannte Klärschlamm-mengen online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.itad.de/information/abfallverwertungsanlagen>
- [JACOBS]** Jacobs U.: Kosten und Wirtschaftlichkeit der Klärschlamm-trocknung, – Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung – in: Energie aus Abfall, Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), TK Verlag, Neuruppin 2013 aktualisiert am: 30.01.2018
- [KOALITIONSVERTRAG]** Deutschlands Zukunft gestalten Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD; 18. Legislaturperiode S. 120 Online abgerufen am/unter: 14.02.2018 <https://www.bundesregierung.de/Content/DE/StatischeSeiten/Breg/koalitionsvertrag-inhaltsverzeichnis.html>
- [KONRADI]** Konradi, S.; Brückner, J.; Vogel, I.: Humanarzneimittelrückstände im Klärschlamm – Priorisierungskonzept zur Einstufung des Umweltgefährdungspotentials für den Boden. Mitteilungen Umweltchemie und Ökotoxikologie 20 (2014)2, S. 26-30
- [KOPP]** Kopp, J.: Eigenschaften von Klärschlamm; Tagungsbeitrag VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung; Offenbach, 27-28.10.2010
- [KRATZ/SCHNUG]** Kratz, S.; Schnug, E.: Agronomische Bewertung von Phosphatdüngern, Vortrag bei Symposium: Ressourcen schonender Einsatz von Phosphor in der Landwirtschaft, Braunschweig, 10./11.11.2008, www.jki.de
- [KRÜGER/ADAM]** Krüger, O.; Adam, C.: Monitoring von Klärschlammverbrennungsaschen hinsichtlich ihrer Zusammensetzung zur Ermittlung ihrer Rohstoffrückgewinnungspotentiale und zur Erstellung von Referenzmaterial für die Überwachungsanalytik, BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Umweltforschungsplan, Herausgeber Umweltbundesamt, Berlin 2014
- [KRWG]** Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz – KrWG): BGBl Jahrgang 2012 Teil I Nr. 10, Bonn, 29. 02. 2012, Zuletzt geändert durch Art. 2 Abs. 9 G v. 20.07.2017
- [LAGA 2012]** Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall: Bewertung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Nutzung sekundärer Phosphorreserven, 2012
- [LAGA 2015]** Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall: Ressourcenschonung durch Phosphor-Rückgewinnung, 2015
- [LEHRMANN 2010]** Lehrmann F.: Stand und Perspektiven der thermischen Klärschlamm-trennung. Vortrag zur VDI-Fachkonferenz Klärschlammbehandlung; Offenbach; 27./28.10.2010
- [LEHRMANN 2013]** Lehrmann F.: Überblick über die thermische Klärschlammbehandlung – Trocknung, Monoverbrennung und Mitverbrennung – in: Energie aus Abfall, Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hrsg.), TK Verlag, Neuruppin 2013
- [LFL]** Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL): Landwirtschaftliche Verwertung von Klärschlamm. 2006; <http://www.LfL.bayern.de>
- [NIEMANN]** Niemann, H.: Statistik der Verarbeitung Tierischer Nebenprodukte 2016; TNN/II 2017, Bonn, 2017
- [OECD]** OECD: Guideline for the testing of chemicals. Dispersion stability of nanomaterials in simulated environmental media. 2017
- [OLIVA et al.]** Oliva, J.; Bernhardt, A.; Reisinger H. et al: Klärschlamm-Materialien zur Abfallwirtschaft; Umweltbundesamt AT; Report; Klagenfurt 2009
- [RÄBIGER]** Rübiger, N.: Projekt wasser-wissen. Institut für Umweltverfahrenstechnik; Online abgerufen am/unter: 12.02.2018 <http://www.wasser-wissen.de/>
- [RÖMER et al.]** Römer W. et al. : U-238, U-235, Th- 232 und Ra-226 in einigen ausgewählten Rohphosphaten, Phosphatdüngern, Boden- sowie Pflanzenproben aus einem P-Düngungsversuch, Journal für Kulturpflanzen, 2010 (62) Nr. 6 S. 200 – 210
- [SCHEIDIG]** Scheidig K.: Wirtschaftliche und energetische Aspekte des Phosphor- Recyclings aus Klärschlamm, KA Korrespondenz Abwasser, Abfall, 2009 (56) Nr. 11 S. 1138-1146
- [SCHMITZ]** Schmitz, E.: Perspektiven der Mitverbrennung von Klärschlämmen; 6. Klärschlamm-tage der DWA; Fulda, 12 Mai 2009
- [SCHWABE/PAFFRATH]** Schwabe, U.; Paffrath, D. (Hrsg.) (2012): Arzneiverordnungs-Report 2012: Aktuelle Daten, Kosten, Trends und Kommentare. Springer-Verlag. Berlin in: Umweltbundesamt (2014): Arzneimittel in der Umwelt – vermeiden, reduzieren, überwachen. Umweltbundesamt Fachgebiet IV 2.2 Arzneimittel, Wasch- und Reinigungsmittel. Stand April 2014
- [SCHWIRN/VÖLKER]** Schwirn, K.; Völker, D.: Nanomaterialien in der Umwelt – Aktueller Stand der Wissenschaft und Regulierungen zur Chemikaliensicherheit Empfehlungen des Umweltbundesamtes (2016)
- [STENZEL et al.]** Stenzel, F.; Wiesgickl, S; Jung, R.; Dexheimer, K.; Eißing, M.; Mundt, M.: Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung. Forschungsvorhaben des Umweltforschungsplans FKZ 3715 33 4010. Entwurf Abschlussbericht 2017
- [SIX]** Six, J.: Auswertung der KEK 3 Umfrage. DWA-Arbeitskreis KEK 3, Frankfurt, 2016
- [SRU]** Sachverständigenrat für Umweltfragen: Arzneimittel in der Umwelt. Stellungnahme Nr. 12. April 2007
- [STENZEL]** Arzneimittelrückstände in Rezyklaten der Phosphorrückgewinnung. Forschungsvorhaben des Umweltforschungsplans FKZ 3715 33 4010. Entwurf Abschlussbericht 2017
- [UBA 97]** Umweltbundesamt: Hygienische Fragen der Umwelttechnik – Abwasserhygiene; in: Jahresbericht 1997 Umweltbundesamt S. 100-101
- [USGS]** U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries 2017: Online abgerufen am/unter: 12.02.2018 <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/mcs/>

[VDZ A] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2016; Düsseldorf, August 2017

[VDZ B] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2015; Düsseldorf, August 2016

[VDZ C] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2014; Düsseldorf, August 2015

[VDZ D] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2013; Düsseldorf, August 2014

[VDZ E] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2012; Düsseldorf, August 2013

[VDZ F] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2011; Düsseldorf, August 2012

[VDZ G] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2010; Düsseldorf, August 2011

[VDZ H] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2009; Düsseldorf, August 2010

[VDZ I] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2008; Düsseldorf, August 2009

[VDZ J] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2007; Düsseldorf, August 2008

[VDZ K] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2006; Düsseldorf, August 2007

[VDZ L] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2005; Düsseldorf, August 2006

[VDZ M] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2004; Düsseldorf, August 2005

[VDZ N] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Environmental Data of the German Cement Industry 2003; Düsseldorf, August 2004

Anhang I

Tab. 22

Technische Daten der Monoklärschlammverbrennungsanlagen für kommunalen Klärschlamm (Stand 2012)

Standort	Bundesland	Anlagenbetreiber	Kapazität [t/a]	TR [%]	Kapazität [t TS/a]
Altenstadt	BY	Emter GmbH	160.000	25–30	55.000
Balingen	BW	Zweckverband Abwasserreinigung Balingen	1.500	75–80	1.200 (Erweiterung auf 2.400)
Berlin-Ruhleben	BE	Berliner Wasser Betriebe	325.000	26	84.100
Bitterfeld-Wolfen*	ST	Gemeinschaftsklärwerk Betriebsgesellschaft mbH & Co. KG Greppin	50.700	25–90	15.200
Bonn	NW	Tiefbauamt Bonn	29.100	23,5	8.000
Bottrop	NRW	Emscher-genossenschaft	110.000	40	44.000
Dinkelsbühl	BY	KSV GmbH	21.425	25–30	5.326
Düren	NW	Wasserverband Eifel-Rur	35.000	40	14.000
Elverlingsen-Werdohl	NW	WFA E Elverlingsen GmbH	200.000	28–32	61.320
Frankfurt am Main	HE	Stadtentwässerung Frankfurth am Main	188.000	28	52.560
Gendorf*	BY	Infraserv	40.000	20–35	10.000
Hamburg	HH	VERA Klärschlammverbrennung GmbH	197.100	40	78.840
Herne	NW	BAV Aufbereitung Herne GmbH	50.000	25–90	22.200
Karlsruhe	BW	Stadt Karlsruhe	80.000	25	20.000
Lünen	NRW	Innovatherm GmbH	235.000	25–95	95.000
München	BY	Münchner Stadtentwässerung	88.000	25	22.000
Stuttgart	BW	Tiefbauamt Stuttgart	130.000	25	32.000
Neu-Ulm	BY	Zweckverband Klärwerk Steinhäule	64.000	25	16.000
Wuppertal	NW	Wupperverband	128.000	25	32.000
Sande/Wilhelmshaven	NS	Spitz GmbH	k. A.	k. A.	2.250
Straubing	BY	Huber SE	9.000 t/a entwässerter KS	28	2.500
Mannheim	BW	Kopf	10.800	k. A.	k. A.

* Verbrennen kommunalen und industriellen Klärschlamm. Deshalb auch Nennung in Tabelle 23.

	Inbetriebnahme [-]	Betriebsstunden 2009 [h/a]	Input		Entwässerung	
			Schlammzustand (Roh-/Faulschlamm) [-]	Schlammarten [-]	Aggregat zur Entwässerung [-]	Restwassergehalt insges. (i. Mittel) [%]
	2008	7.000	k. A.	kommunaler Klärschlamm	Dekanter	k. A.
	2002	k. A.	Faulschlamm	Klärschlamm	Kammerfilterpresse	69
	1985	8.760	Rohschlamm 3,5% TS	Klärschlamm	Zentrifuge	74
	1997	7.738	Rohschlamm	Industrieller und kommunaler Klärschlamm	Zentrifuge	74
	1981	6.854	Faulschlamm	Klärschlamm, Schwimmschlamm	Zentrifuge	76,5
	1.991	7.800	Faulschlamm	Klärschlamm	Membranfilterpresse	60
	2008	4.309 (außer Betrieb seit 2010)	Faulschlamm	Kommunaler KS	k. A.	72
	1975	8.400	2009 Rohschlamm; (ab 2010 auch Faulschlamm)	Klärschlamm	Zentrifuge	74
	2002	7.313	Faulschlamm	Klärschlamm	KFP ZF	68–72
	1981	6.851 je Linie im Mittel; 20.552,5 Summe von 3 Linien parallel in Betrieb	Rohschlamm	Klärschlamm	Zentrifuge	71
	2006	k. A.	Rohschlamm	Industrieller und kommunaler Klärschlamm	Dekanter	26
	1997	23.463 h = 3 Linien = 7.821 pro Linie	Faulschlamm	Klärschlamm	Zentrifuge	78
	1990	k. A.	Faulschlamm	Klärschlamm	k. A.	10–75
	1982	6.500	Rohschlamm	Klärschlamm, Rechengut, Fettfanggut	Zentrifuge	75
	1997	7.850	Faulschlamm	Klärschlamm, Filterkuchen	Zentrifugen, Membranfilterpressen	60
	1997	8.430	Faulschlamm	Klärschlamm	Zentrifuge	72
	2007	Linie 3: 4.809	Roh-, Faul-, Überschussschlamm	Klärschlamm, Rechengut, Fettfanggut	Zentrifuge	75
	1979	k. A.	Rohschlamm/Faulschlamm	Klärschlamm, Rechengut, Sand- und Fettfanggut	Zentrifuge	75
	1977	8.586	Faulschlamm	Klärschlamm	Zentrifuge, Kammerfilterpresse	75
		außer Betrieb	Faulschlamm	Klärschlamm	extern	k. A.
	2012	auf 7.500 h/a ausgelegt	Faulschlamm	Klärschlamm, Rechengut	Zentrifuge	72
	2010	7.000 h/a geplant	Faulschlamm	Klärschlamm, Rechengut	k. A.	k. A.

Quelle: [EIGENE ERHEBUNG]

Allgemein	TROCKNUNG			Verbrennungs- einheiten
	Standort	Aggregat [-]	Restwassergehalt nach Trocknung [%]	
Altenstadt	Thermalölkreislauf	25–30	Rostfeuerung	2 Öfen
Balingen	Solartrocknung	20–25	Wirbelschichtvergaser	eine Vergasungslinie
Berlin-Ruhleben	k. A.	k. A.	stationäre Wirbelschicht	3
Bitterfeld-Wolfen*	Scheibentrockner	55	stationäre Wirbelschicht	1
Bonn	k. A.	k. A.	stationäre Wirbelschicht	2
Botrop	k. A.	k. A.	stationäre Wirbelschicht	2
Dinkelsbühl	Bandrockner	< 10	Pyrobuster	1
Düren	Scheibentrockner	60	stationäre Wirbelschicht	1
Elverlingsen-Werdohl	k. A.	k. A.	stationäre Wirbelschicht	1
Frankfurt am Main	Etagenwirbler	ca. 30 (Eintritt in Wirbelschicht)	Etagenwirbler	4
Gendorf*	Scheibentrockner	50	Wirbelschicht	1
Hamburg	Scheibentrockner	58	stationäre Wirbelschicht	3
Herne	k. A.	k. A.	stationäre Wirbelschicht	1
Karlsruhe	Scheibentrockner	55	stationäre Wirbelschicht	2 (1+1)
Lünen	k. A.	k. A.	Wirbelschicht	1
München	Kontaktscheibentrockner	55	stationäre Wirbelschicht	2
Stuttgart	Scheibentrockner	55	stationäre Wirbelschicht	2
Neu-Ulm	Dünnschichttrockner	60	stationäre Wirbelschicht	2
Wuppertal	Dünnschichttrockner	55	stationäre Wirbelschicht	2
Sande/Wilhelmshaven	Fließbettrockner	15	Zykloïdbrennkammer	1
Straubing	Bandrockner	35	Rost (Flugverbrennung)	1
Mannheim	Trommeltrockner	k. A.	Wirbelschichtvergasung	1

* Verbrennen kommunalen und industriellen Klärschlamm. Deshalb auch Nennung in Tabelle 23.

VERBRENNUNG					
	Heizwert des Klärschlammes im Jahresmittel	theor. Kapazi- tät je Einheit (i. Mittel)	tatsächlich verbrannte Menge 2009	Hersteller Ver- brennereinheit	Zusatzbrenn- stoff
	[kJ/kg]	[t TS/h]	[t TS/a]	[-]	[-]
	8.000	je 2,5 t TM/h	23.000	k. A.	k. A.
	k. A.	0,18	k. A.	Kopf	Faulgas
	ca. 17 MJ/kg TR	3,20	41.128	Uhde	Heizöl
	5.950 oder 10.200 kJ/kg TS	2	10.262	Uhde	Erdgas
	k. A.	1,42	6.600	Raschka	Faulgas, Heizöl
	4.500	2 x 3,0	46.000	Raschka	Heizöl
	10,9 / 11,8	0,6	1.290	Eisenmann AG	Heizöl/Propangas
	2009: 14.604 kJ/kg TS nur Rohschlamm verbrannt (2010: Rohschlamm: 12.820 kJ/kg TS, Faulschlamm: 3.700 kJ/kg TS)	1,75	10.924	Lurgi	Erdgas
	1.000 in OS bzw. zwischen 10.000 und 13.000 kJ/kg TS	7,00	55.000-60.000	TKEC	Kohle/Erdgas/ Heizöl/SBS
	17.000 kJ/kg TS; 3.100 kJ/kg feucht	2,00	33.946	Lurgi	Heizöl (Leichtöl)
	k. A.	1,25	k. A.	k. A.	Erdgas
	3.650; (bzw. 13 MJ/kg TR im Jahr 2009. In 2010 hatten wir 13,6 MJ/kg TR)	3,4	60.256	AE & E	Heizöl, Faulgas
	k. A.	8	k. A.	Raschka	Heizöl
	14.000–15.000	1,90 2,70	13.000	Raschka	Heizöl
	4.000	13	95.000	Raschka	Heizöl
	4.500 /10.000	3	21.421	Raschka	Faulgas
	13,8 MJ/kg TS	4,00	22.700	Bamag	Faulgas, Heizöl
	k. A.	2,00	16.389	Thyssen	Heizöl
	Heizwert im Jahresmittel (gewichtet): 12.100 kJ/kg TS; Spanne: 9.300 bis 14.370 kJ/kg TS	4,60	29.557	Thyssen	Heizöl
	k. A.	0,30	0	Steinmüller	Erdgas
	7.000 kJ/kg	530 kg/h	3.500	Fa. Zauner	k. A.
	k. A.	k. A.	k. A.	Kopf	k. A.

Quelle: [EIGENE ERHEBUNG]

ALLGEMEIN		WÄRMENUTZUNG				Abgasreini- gungslinien
Standort	Aggregat [-]	Hersteller [-]	Dampf- parameter (im Mittel)	elekt. Brutto- leistung	Energienutzung	
			[bar/°C]	[MW]	[-]	
Altenstadt	Kessel mit Thermalöl	k. A.	k. A.	k. A.	Wärme zur Trock- nung	1
Balingen	BHKW	Kopf / EAG	k. A.	k. A.	Strom, Wärme	1
Berlin-Ruhleben	Wasserrohrkessel (Naturumlauf)	L. & C. Stein- müller	46/460	1 x 2,8 2 x 2,0	Strom, Wärme	3
Bitterfeld-Wolfen*	Naturumlauf	Bertsch	10/180	k. A.	Wärme	1
Bonn	Abhitzezwang- durchlaufkessel	Stahl	10/180	k. A.	Wärme, Strom	2
Bottrop	Zwangsumlaufkessel	Raschka	35/400	3,5	Wärme, Strom	2
Dinkelsbühl	Abhitzedampfkessel	HTA GmbH	10/184	k. A.	Trocknung	1
Düren	Abhitzekessel Wär- meträgeröl	Ohl	k. A.	k. A.	Wärme	1
Elverlingsen-Werdohl	Dampfkessel	Bertsch	17 / 320	k. A.	Hilfsdampf für Kraft- werksbedarf	1
Frankfurt am Main	Dampfkessel	Lentjes	38/380	3	Wärme, Strom	4
Gendorf*	k. A.	k. A.	20/215	k. A.	k. A.	k. A.
Hamburg	Naturumlaufkessel	AE & E	40/400	32 DT und Dampf AHK	Wärme, Strom	3
Herne	Drehrohr Trockner für Schlammkohle	Hoffmeyer	k. A.	k. A.	Wärme	2
Karlsruhe	Naturumlaufkessel	Raschka, Oschatz	25/300 25/300	k. A.	Wärme, Strom	2
Lünen	Naturumlaufkessel	Noell-KRC	40/400	8,5	Strom	1
München	Abhitzekessel	Wamser	40/400	0,27	Wärme für Eigen- bedarf, Strom	4
Stuttgart	Abhitzekessel	Bertsch	63/410	1,2 MW	Wärme, Strom	2
Neu-Ulm	Wasserrohrkessel	UMAG, Baumgarte	24/250 40/400	k. A.	Wärme Strom	4
Wuppertal	Abhitzekessel mit Naturumlauf	Blohm + Voss	31/355	k. A.	Wärme, Strom	2
Sande/Wilhelmshaven	Abhitzekessel mit Naturumlauf	Wulff	19/210	k. A.	Wärme	4
Straubing	Wärmetauscher/ Mikrogasturbine	Turbine: Turbec	k. A.	80 kW el.	800 kW therm.	1
Mannheim	BHKW	k. A.	k. A.	3,6 MW	Wärme	1

* Verbrennen kommunalen und industriellen Klärschlamm. Deshalb auch Nennung in Tabelle 23.

ABGASREINIGUNG					SCHLACKE- BZW. ASCHEN- VERWERTUNG/ENTSORGUNG	
Staub- abscheider	weitere Abgasreinigung	weitere Abgas- reinigung	weitere Abgas- reinigung	Verwertung/ Beseitigung in	Menge	
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	t/a	
Zyklon + Gewebefilter nach Flug- stromadsorber	Entstickung (SNCR)	Flugstromadsorber	2-stufiger Wäscher	Vorwiegend landwirt- schaftl. Verwertung, ansonsten Asphaltmi- schwerk	8.500	
Zyklon + Kera- mikfilter	Nasswäsche	Teerkondensation	k. A.	Asphaltmischwerk	500	
Elektrofilter	Nass/Absorber	k. A.	k. A.	Bergversatz	14.400	
Elektrofilter, Gewebefilter	Nass/2-stuf. Wäscher	Flugstromadsorber	k. A.	Bergversatz	5.233	
Elektrofilter	Quasitrocken/Absorber	Flugstromadsorber	k. A.	Deponieabdeckung	3.200	
Elektrofilter	Nass/2-stuf. NaOH-Wäscher	k. A.	k. A.	Asphaltmischwerk	18.000	
Zyklon	Sorptionsmittel	Staubfilter	k. A.	als Bauzuschlags- stoff geprüft, z.Z. auf Deponie	bis 1.700 (442 in 2009)	
Nass-wäscher	SO ₂ -Wäscher	Festbettfilter zur Queck- silberabscheidung	SNCR-Anlage	Deponie/Deponiebau	3.467	
Elektrofilter	Sprühtrockner, saurer Wäscher, SO ₂ -Wäscher	HOK + Gewebefilter	k. A.	Deponie/Deponiebau	35.000	
Elektrofilter	Nass/4-stuf. Wäsche	Festbettadsorber (Aktivkohle)	k. A.	Bergversatz	6.803	
k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	
Elektrofilter	Nass/Pfeifenquenche, Gegenstromwäscher	Flugstromadsorber	k. A.	Kupferhütte Flugasche	21.834	
Gewebefilter	Trockensorption	Primäradditivierung	k. A.	Asphaltmischwerk	8.900	
Elektrofilter	Nass/Oxidations-Venturi- wäscher, 3-stufig	k. A.	k. A.	Bergversatz	4.000	
Elektrofilter, Gewebefilter	Quasitrocken, 2-stuf. Wäscher	Flugstromadsorber	k. A.	Deponie/Deponiebau	40.000	
Elektrofilter	Gewebefilter	2-stufig. Wäscher	Nass-Elekt- rofilter	Deponie/Deponiebau	8.500	
Elektrofilter	Quasitrocken/ Strahlwä- sche, Füllkörperwäscher	Flugstromadsorber + HOK	Elektrofil- ter 2	Bergversatz	8.220 (2009)	
Elektrofilter, Gewebefilter	Nass/Strahlwäscher, Füll- körperwäscher	Trockenadditiv, Gewebefilter, Flug- stromadsorber	k. A.	Bergversatz	7.400	
Elektrofilter	Nass/2-stuf. Wäscher; saurer ohne Einbauten, bas. mit Füllkörper	Aktivkoksadsorber und Gewebefilter	k. A.	Bergversatz	12.412	
Gewebefilter, Heißgas-Zyklon	Trocken/Verdampfungs- kühler	Herdofenkoksfilter	k. A.	k. A.	k. A.	
Hydrozyklon	Gewebefilter	SNCR	Kalkein- düsung	P-Recycling geplant	1.400 t/a	
Keramikfilter	Trockner	Gaswäsche 2-Stufig	k. A.	k. A.	k. A.	

Quelle: [EIGENE ERHEBUNG]

Tab. 23

Technische Daten der betriebseigenen Klärschlammverbrennungsanlagen (Stand 2012)

ALLGEMEIN						
Standort	Bundesland [-]	Betreiber [-]	Technologie [-]	Dauerbetrieb ab [-]	Betriebs- stunden [h/a]	Kapazität [t/a]
Burghausen	BY	Wacker Chemie	1 Wirbel- schicht	1976	k. A.	20.000
Frankenthal-Mörsch	RP	BASF AG	2 Wirbel- schichten	1992	Ofen1: 7.158 Ofen2: 6.445	420.000
Frankfurt Hoechst	HE	Infraserv GmbH	2 Wirbel- schichten	1994	Str I: 8.164h; Str II: 8.055h	205.000
Leverkusen	NW	Currenta GmbH	1 Etagenofen	1988	8.000	120.000
Marl	NW	Infracor GmbH	1 Wirbel- schicht	1980	k. A.	40.000
Bitterfeld-Wolfen	SH	GKW	Technische Daten in Tabelle 22			
Gendorf/Burgkirchen	BY	Infraserv GmbH	Technische Daten in Tabelle 22			

ALLGEMEIN		VERBRENNUNG				
Standort	Restwasser- gehalt nach Trocknung [%]	Verbrennungs- technologie [-]	Verbrennungs- einheiten [-]	Heizwert des Klärschlammes im Jahresmittel [kJ/kg]	theor. Kapazi- tät je Einheit (im Mittel) [t TS/h]	tatsächlich verbrannte Menge 2009 [t TS/a]
Burghausen	60	SW	1	k. A.	0,6	k. A.
Frankenthal-Mörsch	k. A.	SW	2	2.000	7 t TR	110.000
Frankfurt Hoechst	k. A.	SW	2	3.500	4,2	70.000
Leverkusen	k. A.	EO	1	4.200	4,5	23.387
Marl	k. A.	SW	1	k. A.	3	k. A.
Bitterfeld-Wolfen	Technische Daten in Tabelle 22					
Gendorf/Burgkirchen	Technische Daten in Tabelle 22					

ALLGEMEIN		ABGASREINIGUNG			
Standort	Energienutzung [-]	Abgasreini- gungslinien [-]	Staubabscheider [-]	weitere Abgasreinigung [-]	
Burghausen	Dampf zur Trocknung	1	Zyklon	Vorsättiger+ venturi-Wäscher	
Frankenthal-Mörsch	Wärme, Strom	2	Elektrofilter	Nass/ Füllkörperkolonne	
Frankfurt Hoechst	Wärme, Dampf	2	Elektrofilter	Nass/ 2 stufi e Nasswäsche	
Leverkusen	Wärme, Dampf	1	Nass/Einspritzkühler, 2-stuf. Ro- tationswäscher, Strahlgaswäscher	Flugstromreaktor	
Marl	Dampf	4	Gewebefilter	Trocken + Nass	
Bitterfeld-Wolfen	Technische Daten in Tabelle 22				
Gendorf/Burgkirchen	Technische Daten in Tabelle 22				

TR [%]	Kapazität [t TM/a]	INPUT		ENTWÄSSERUNG		TROCKNUNG	
		Schlammzustand (Roh-/Faulschlamm) [-]	Schlammarten [-]	Aggregat zur Entwässerung [-]	Restwasser- gehalt insges. (im Mittel) [%]	Aggregat [-]	
21	4.125	Rohschlamm	(komm. u.) indus- tr. Klärschlamm	Bandfilterpresse	80	Dünnschicht- trockner	
40	110.000	Rohschlamm	industr. Klär- schlamm	Kammer-/Mem- branfilterpresse	57	k. A.	
35	80.000	Rohschlamm	komm. u. industr. Klärschlamm	Membranfilter- presse	65–70	k. A.	
27–40	36.000	Rohschlamm	industr. Klär- schlamm	Membranfilter- presse	60	k. A.	
25	10.000	Rohschlamm	komm. u. industr. Klärschlamm	Eindicker, Sieb- bandpresse“	75	k. A.	

Hersteller Verbrenner- einheit [-]	Zusatzbrennstoff [-]	WÄRMENUTZUNG				elekt. Bruttolei- stung [MW]
		Aggregat [-]	Hersteller [-]	Dampfparame- ter (im Mittel) [bar/°C]		
Lurgi	Erdgas	Abhitzeessel	Wehrle	16,5/200	k. A.	
Rheinstahl/ MAB-Lentjes	Steinkohle, EBS, Heizöl EL	Naturumlauf	Lentjes	63/420	max. 13 MW (2009: 60.190 MWh (brutto))	
Uhde	Kohle, Heizöl, Erdgas	Abhitzeessel mit Naturumlauf	MAN/GHH	16/280	k. A.	
Lurgi	Erdgas, Heizölsubsti- tute in Nachbrennk.	Strahlungszüge, Überhitzer, ECO	Lentjes	41/360	k. A.	
Raschka	Erdgas, betriebs- eigene Brenngase	Abhitzeessel	Wehrle	25/220	k. A.	

weitere Abgasreinigung [-]	SCHLACKEVERWERTUNG/ENTSORGUNG			Menge t/a
	weitere Abgasreinigung [-]	Verwertung/Beseitigung in [-]		
Aerosolabscheider	Absorptionswäscher	k. A.		k. A.
		Vermeidung, Bergversatz in Salzstöcken		42 736 (KS+Kohle+EBS)
keine	keine	Deponie/ Bergwerkversatz		33.000
k. A.	Beseitigung SAD Lever- kusen	16.992		k. A.
SCR, Festbettadsorber		k. A.		k. A.

Tab. 24

Anlagendaten der Abfallverbrennungsanlagen, die Klärschlamm mitverbrennen (Stand 2016)

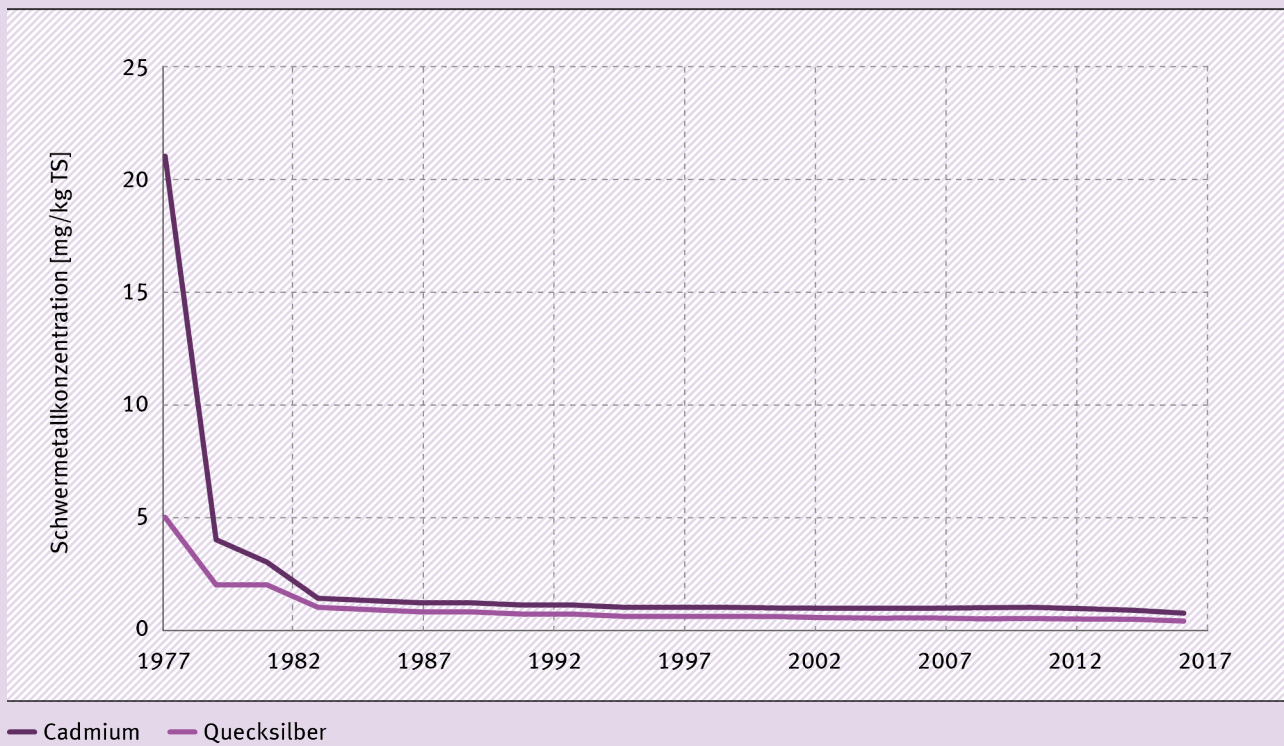
Standort	Bundesland	Anlagenbetreiber	verbrannte Menge an Schlamm aus der kommunalen Abwasserbehandlung (nur AVV 190805) in Mg TR / a in 2016
Asdonkshof	NRW	Abfallentsorgungszentrum Asdonkshof	7.993
Bamberg	BY	Zweckverband Müllheizkraftwerk Stadt und Landkreis Bamberg	3.773
Bremen	HB	Müllheizkraftwerk Bremen	3.723
Coburg	BY	Zweckverband für Abfallwirtschaft in Nord-west-Oberfranken	1.407
Großräschen	BB	EEW Energy from Waste Großräschen GmbH	2.185
Helmstedt	NI	EEW Energy from Waste Helmstedt GmbH	2.118
Herten	NRW	AGR Betriebsführung GmbH	873
Ingolstadt	BY	Zweckverband Müllverwertungsanlage Ingolstadt	2.064
Krefeld	NRW	EGK Entsorgungsgesellschaft Krefeld GmbH & Co. KG	7.795
München	BY	Müllheizkraftwerk München Nord	291
Neunkirchen	SL	Abfallheizkraftwerk Neunkirchen	186
Olching	BY	AHKW Geiselbullach	414
Salzbergen	NI	Thermische Abfallbehandlungsanlage Salzbergen (TAS)	3.962
Schweinfurt	BY	GKS-Gemeinschaftskraftwerk Schweinfurt GmbH	315
Würzburg	BW	Zweckverband Abfallwirtschaft Raum Würzburg	1.596
Zella-Mehlis	TH	Zweckverband für Abfallwirtschaft Südwest-thüringen (ZAST)	385
9 weitere nicht genannte Anlagen			3.242
<i>Mittelwert</i>			2.489
Summe			42.320

Quelle: [ITAD]

Anhang II

Abbildung 17

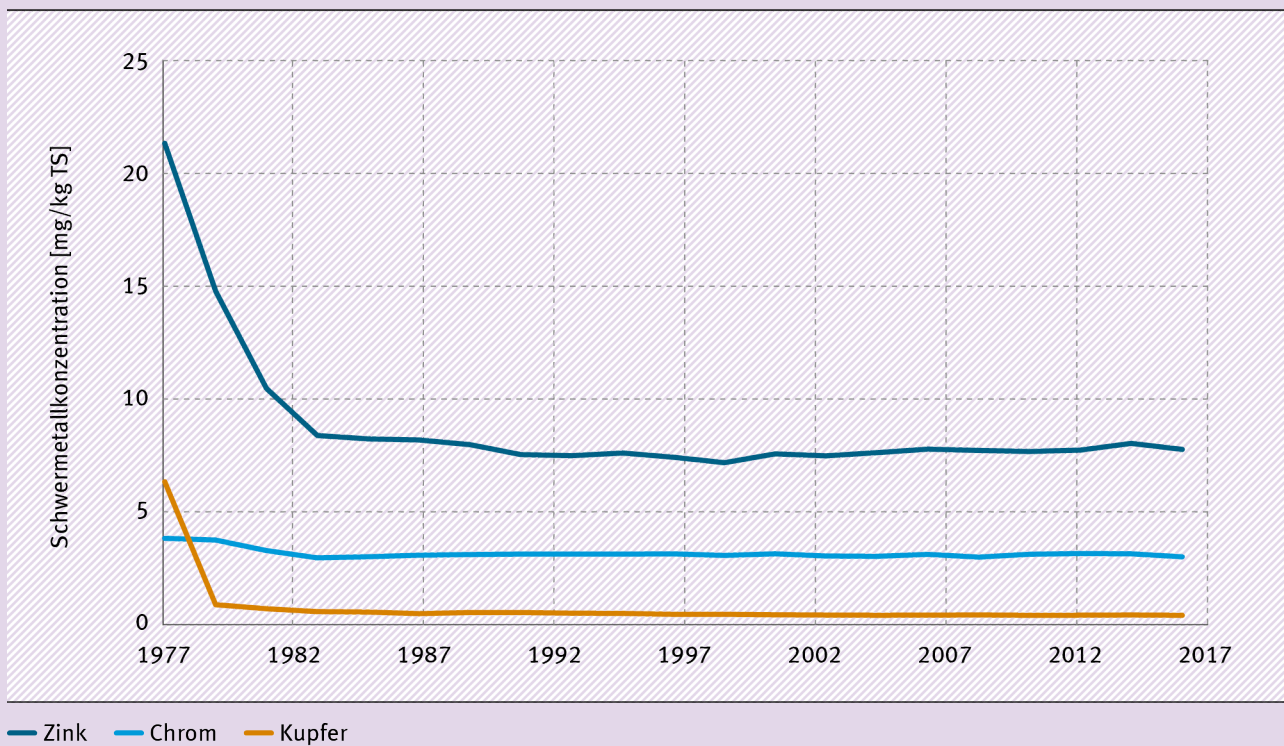
Schwermetallkonzentrationen von Cadmium und Quecksilber im Zeitraum von 1977 bis 2015



Quelle: [eigene Darstellung aus Klärschlammberichterstattung der Länder gemäß Commission Decision 94/741/EC]

Abbildung 18

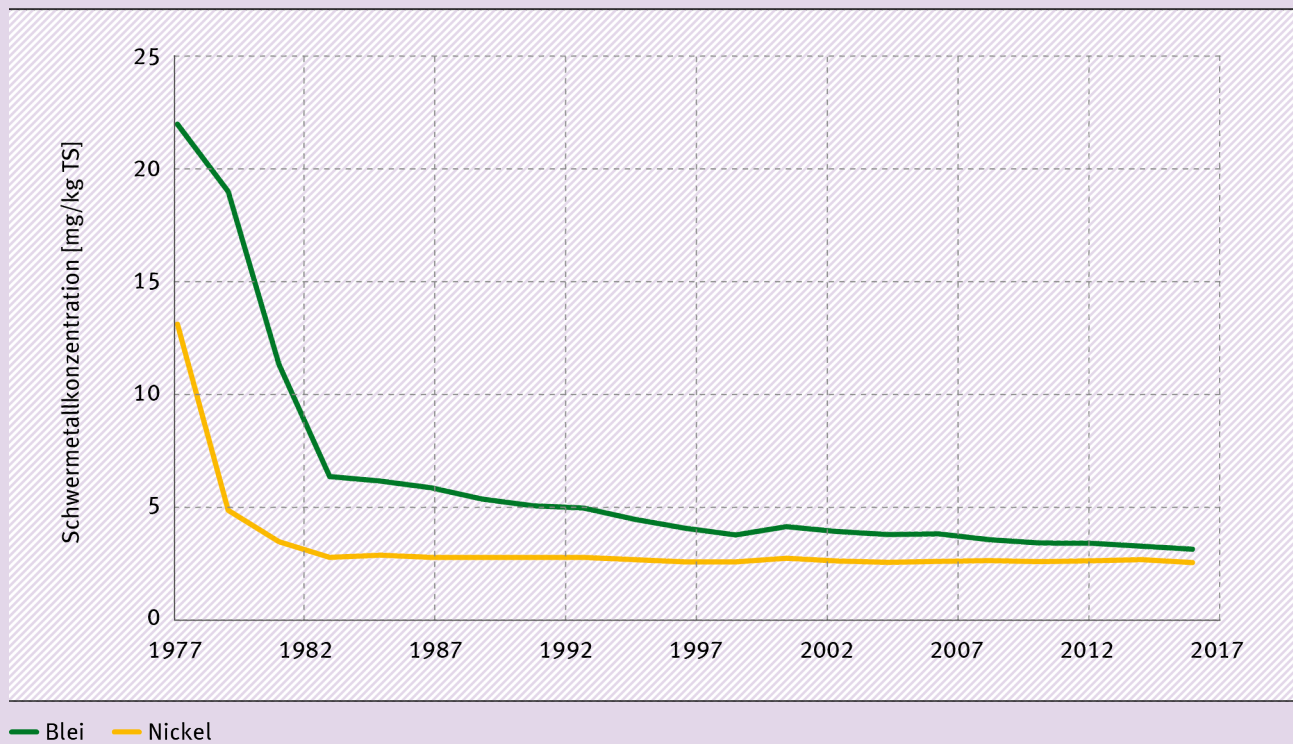
Schwermetallkonzentrationen von Chrom, Kupfer und Zink im Zeitraum von 1977 bis 2015



Quelle: [eigene Darstellung aus Klärschlammberichterstattung der Länder gemäß Commission Decision 94/741/EC]

Abbildung 19

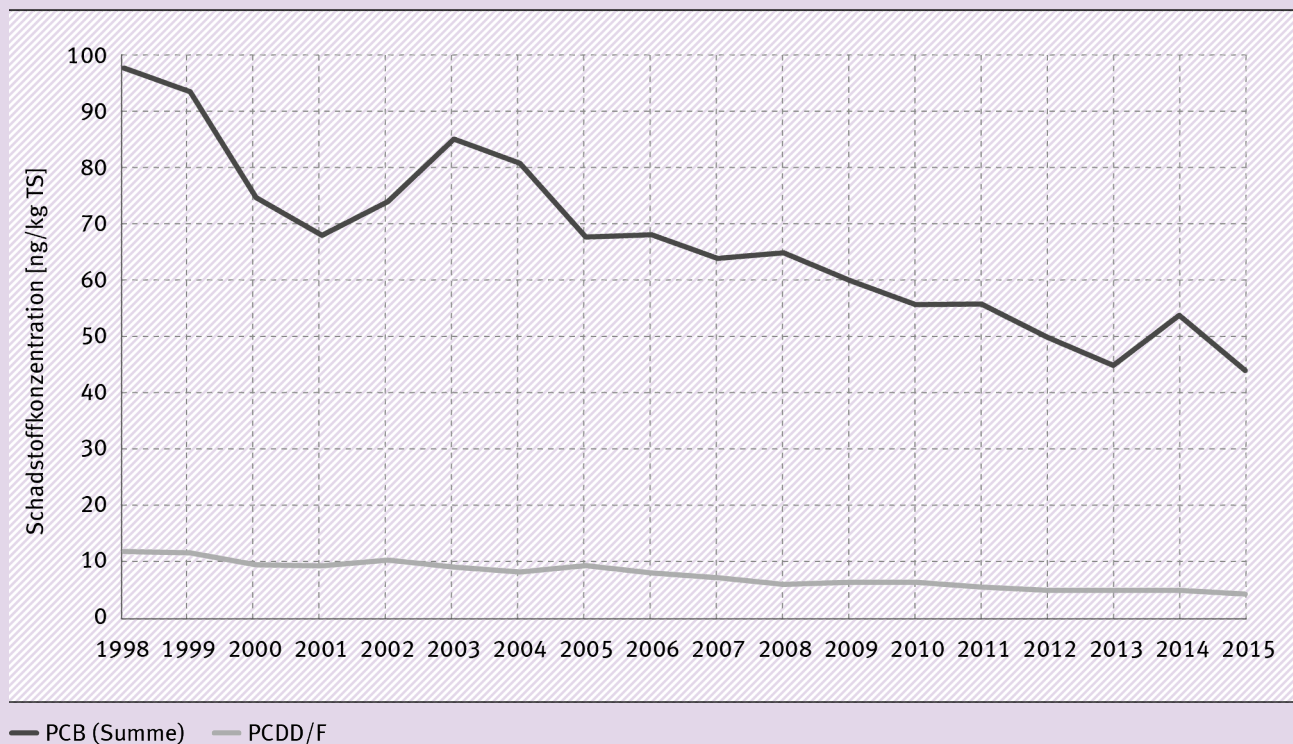
Schwermetallkonzentrationen von Nickel und Blei im Zeitraum von 1977 bis 2015



Quelle: |eigene Darstellung aus Klärschlammberichterstattung der Länder gemäß Commission Decision 94/741/EC|

Abbildung 20

Schadstoffkonzentrationen von PCB (Summe) und PCDD/F im Zeitraum von 1998 bis 2015



Quelle: |eigene Darstellung aus Klärschlammberichterstattung der Länder gemäß Commission Decision 94/741/EC|

Abbildung 21

Schadstoffkonzentration von AOX im Zeitraum von 1977 bis 2015



Quelle: [eigene Darstellung aus Klärschlammberichterstattung der Länder gemäß Commission Decision 94/741/EC]

Anhang III

Tab. 25

TECHNISCHE DATEN DER KLÄRSCHLAMMTROCKNUNGSANLAGEN IN DEUTSCHLAND (STAND 2018)

Nr.	Standort / Betreiber	Bundesland	Verfahren	Hersteller
1	Albstadt	BW	Bandrockner	Haarslev/Sevar
2	Allershausen	BY	Solartrockner	IST Energietechnik
3	Allmendingen	BW	Trommeltrockner	Andritz
4	Altenstadt – EMTER	BY	Schneckenrockner	KonTroTec
5	Anhausen	RP	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
6	Anhausen	RP	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Seiler Biogasanlagen GmbH
7	Aschaffenburg	BY	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Thermo System
8	Asdonkshof – Kamp-Lintford	NW	Wirbelschichtrockner	Kraftanlagen Heidelberg
9	Asse	NI	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
10	Augustdorf	NRW	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
11	Backnang	BW	Bandrockner mit Abwärme	HUBER
12	Bad Tölz	BY	Solartrockner	Solartiger
13	Balingen	BW	Bandrockner mit Abwärme	HUBER
14	Bayreuth	BY	Solartrockner mit Abwärme	HUBER
15	Bergen	MV	Schneckenrockner	KonTroTec
16	Bernburg	SA	Schaufeltrockner	Andritz
17	Bernstadt	BW	Solartrockner	Thermo System
18	Bitterfeld-Wolfen	SA	Scheibentrockner	Wulff / Haarslev
19	Blaufelden	BW	Solartrockner	RATUS
20	Blindham	BY	Solartrockner	Solartiger
21	Bodnegg	BW	Solartrockner	Thermo System
22	Bonndorf	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Seiler Biogasanlagen GmbH
23	Bonndorf im Schwarzwald	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
24	Bredstedt	SH	Solartrockner	Thermo System
25	Bruchmühlbau-Miesau	RP	Bandrockner	Sülzle Klein
26	Bruckmühl	BY	Bandrockner	Sülzle Klein
27	Buch a. Erlbach	BY	Solartrockner	Solartiger
28	Burgebrach	BY	Solartrockner	Thermo System
29	Burgrieden	BW	Solartrockner	IST Energietechnik
30	Crailshaim-Dinkelsbühl	BY	Bandrockner	Andritz
31	Darmstadt	HE	Dünnschicht-/Scheibentrockner	BUSS-SMS-Canzler/Pondus

	Durchsatz tTS/a	Trocknungsgrad	Leistung kg H ₂ O/h	Bemerkung
	5.000	90 %	1.000	Zementindustrie
	150	60–70 %	k. A.	k. A.
	k. A.	90 %	14.300	Zementindustrie
	30.000	90 %	2x5.600	Verbrennung eigener Rostofen
	3.200	90 %	k. A.	Zementindustrie
	900	> 90 %	290	Zementindustrie
	2.700	75 %	k. A.	Thermische Verwertung
	16.000	95 %	6.000	Mitverbrennung in eigener MVA
	88	70 %	k. A.	k. A.
	190	75 %	k. A.	k. A.
	3.680	90 %	1.400	Mitverbrennung im Kraftwerk Heilbronn
	650	> 75 %	k. A.	thermisch
	1.876	85 %	600	Thermische Verwertung (eigene)
	2.700	5– > 90 %	7.000	je nach erreichtem TR, bei > 90 % Zementindustrie
	k. A.	k. A.	550	eigene Verbrennung
	35.000	90 %	2x5.000	Zementindustrie
	220	70–90 %	k. A.	k. A.
	15.170	45–50 %	k. A.	k. A.
	100	85 %	k. A.	Verbrennung
	200	80 %	k. A.	k. A.
	90	90 %	k. A.	k. A.
	500	> 90 %	161	Zementindustrie
	2.000	90 %	k. A.	Zementindustrie
	108	70 %	k. A.	k. A.
	600	88 %	240	Landschaftsbau
	266	90 %	190	Rekultivierung
	90	> 90 %	k. A.	k. A.
	190	70 %	k. A.	k. A.
	300	50–90 %	k. A.	Kompostierung/ Rekultivierung
	5.200	90 %	2.000	k. A.
	13.500	90 %	2x2.630	k. A.

Nr.	Standort / Betreiber	Bundesland	Verfahren	Hersteller
32	Deißlingen	BW	Bandrockner	Sevar
33	Düren, AV Rur	NW	Scheibentrockner	Haarslev
34	Düsseldorf-Nord	NW	Trommeltrockner	Andritz
35	Düsseldorf-Süd	NW	Scheibentrockner	Wehrle
36	Edemissen	NI	Solartrockner	Thermo System
37	Eifel	NI	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
38	Ellwangen	BW	Solartrockner	Thermo System
39	Elsenfeld	BY	Bandrockner	Sülzle Klein
40	Engen	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
41	Engen	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Seiler Biogasanlagen GmbH
42	Enkenbach-Alsenborn	RP	Bandrockner	Sülzle Klein
43	Erfurt	TH	Scheibentrockner	Suelzle Klein (GU), Haarslev-Modul
44	Erfurt	TH	Scheibentrockner	Sülzle Klein
45	Ertingen-Binzwanen	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Seiler Biogasanlagen GmbH
46	Frankenhardt	BW	Solartrockner	Thermo System
47	Freiburg-Forchheim	BW	Scheibentrockner	Haarslev
48	Freystadt	BY	Solartrockner	HUBER
49	Füssen	BY	Solartrockner	Thermo System
50	Gärtringen	BW	Solartrockner mit Abwärme	I+M
51	Georgsmarienhütte	NW	Bandrockner	Klein
52	Gera	TH	Dünnschicht-/Scheibentrockner	BUSS-SMS-Canzler
53	Gifhorn	NI	Dünnschicht-/Scheibentrockner	BUSS-SMS-Canzler/Pondus
54	Großbottwar	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
55	Großbottwar	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Seiler Biogasanlagen GmbH
56	Grünstadt	RP	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
57	Hagen	NI	Solartrockner	IST Energietechnik
58	Hamburg/Köhlbrandhöft	HH	Scheibentrockner	Haarslev
59	Handewitt	SH	Solartrockner	Thermo System
60	Hayingen	BW	Solartrockner mit Abwärme	HUBER
61	Heilbronn	BW	Bandrockner	Sülzle Klein
62	Heilbronn EnBW	BW	Bandrockner	Andritz
63	Herdwangen	BW	Solartrockner	Thermo System
64	Hochdorf Assenheim	RP	Solartrockner mit Abwärme	Roediger
65	Hohentengen am Hochrhein	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
66	Horgau-Bieselbach	BY	Solartrockner mit Abwärme	Roediger

	Durchsatz tTS/a	Trocknungsgrad	Leistung kg H ₂ O/h	Bemerkung
	k. A.	90 %	1.750	k. A.
	11.000	40 %	2.600	Wirbelschichtverbrennung
	5.000	92 %	2.660	k. A.
	6.300	k. A.	2x3.600	Thermische Verwertung
	288	75 %	k. A.	k. A.
	219	50 %	k. A.	Landwirtschaft
	700	70 %	k. A.	k. A.
	4.000	90 %	1.800	Verbrennung
	3.300	90 %	k. A.	Zementindustrie
	900	> 90 %	290	Zementindustrie
	600	85 %	240	Landschaftsbau
	6.250	90 %	2.431	Verbrennung
	5.600	90 %	2.500	Verbrennung
	900	> 90 %	290	Zementindustrie
	143	75 %	k. A.	k. A.
	8.000	90 %	2x1.500	k. A.
	100	75 %	332	k. A.
	625	70 %	k. A.	2.000 m ²
	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	1.800	90 %	800	Zementindustrie
	700	k. A.	700	k. A.
	1.200	90 %	264	Monoverbrennung
	3.300	90 %	k. A.	Zementindustrie
	900	> 90 %	290	Zementindustrie
	500	50–70 %	k. A.	k. A.
	180	70–80 %	k. A.	Landbauliche Verwertung/Verbrennung
	45.000	42 %	6x3.750	Wirbelschichtverbrennung
	220	75 %	k. A.	k. A.
	101	75 %	325	Landwirtschaft
	5.600	90 %	2.500	momentan stillgelegt
	6.500	90 %	2.500	Mitverbrennung im Kohlekraftwerk, abhängig vom Kesseltrieb
	69	90 %	k. A.	k. A.
	1.250	90 %	k. A.	Zementindustrie
	2.900	90 %	k. A.	Zementindustrie
	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

Nr.	Standort / Betreiber	Bundesland	Verfahren	Hersteller
67	Huglfing	BY	Solartrockner	IST Energietechnik
68	Ingolstadt	BY	Bandrockner mit Abwärme	HUBER
69	Innerstetal	NI	Dünnschicht-/Schneckenrockner	BUSS-SMS-Canzler/Pondus
70	Itzehoe	SH	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
71	Jerxheim	NI	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
72	Juist	NI	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
73	Karlsfeld	BY	Solartrockner	IST Energietechnik
74	Karlsruhe	BW	Scheibentrockner	Haarslev
75	Karlstadt	BY	Bandrockner	Andritz
76	Kempten	BW	Bandrockner	Sülzle Klein
77	Kirchheim am Neckar	BW	Solartrockner	Thermo System
78	Kisslegg	BW	Solartrockner	I+M
79	Koblenz	RP	Bandrockner	Sülzle Klein
80	Krefeld	NW	Scheibentrockner	Wehrle
81	Kreßberg	BW	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
82	Kusterdingen	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
83	Ladbergen	NW	Bandrockner	Sülzle Klein
84	Lambsheim	RP	Solartrockner	Thermo System
85	Langenau	BW	Solartrockner mit Abwärme	Roediger
86	Langeoog	NI	Solartrockner	Thermo System
87	Lauterstein-Albdorf	BW	Solartrockner mit Abwärme	Roediger
88	Leintal-Göggingen	BW	Solartrockner	Thermo System
89	Leutershausen-Sachsen	BY	Solartrockner mit Abwärme	Roediger
90	Main-Mud-Miltenberg	BY	Solartrockner mit Abwärme (zeitweise)	IST Energietechnik
91	Mainz Mombach	BW	Bandrockner	Haarslev/Sevar
92	Mallersdorf	BY	Bandrockner	Sülzle Klein
93	Mannheim	BW	Bandrockner mit Abwärme	HUBER
94	Mannheim	BW	Trommelrockner	KHD
95	Markt Au	BY	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
96	Markt Essenbach	BY	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
97	Marktbergel	BY	Solartrockner mit Abwärme	HUBER
98	Mengen	BW	Bandrockner	Haarslev
99	Mintaching / Pfattertal	BY	Bandrockner mit Abwärme	HUBER
100	München-Nord	BY	Scheibentrockner	Wulff & Umag
101	Murnau	BY	Solartrockner mit Abwärme	IST Energietechnik
102	Neckarsulm	BW	Solartrockner mit Abwärme	Roediger
103	Neuburg (a.d.Donau)	BY	Dünnschicht-/Scheibentrockner	BUSS-SMS-Canzler

	Durchsatz tTS/a	Trocknungsgrad	Leistung kg H ₂ O/h	Bemerkung
	120	70 %	k. A.	k. A.
	3.864	90 %	2x575	Müllverbrennung
	780	90 %	620	k. A.
	517	75 %	k. A.	Thermische Verwertung
	200	80 %	k. A.	k. A.
	120	55 %	k. A.	k. A.
	400	70 %	k. A.	k. A.
	10.000	40 %	2.900	eigene Verbrennung
	25.000	90 %	7.800	Zementindustrie
	2.700	90 %	1.200	Zementindustrie
	100	90 %	k. A.	Thermische Verwertung
	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	3.200	90 %	1.400	Zementindustrie
	10.000	92 %	2x4.000	Mitverbrennung in MVA
	90	75 %	k. A.	k. A.
	3.200	90 %	k. A.	Zementindustrie
	5.300	90 %	2.300	Verbrennung
	230	70 %	k. A.	Land. Verwertung
	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
	120	90 %	k. A.	Thermische Verwertung
	2.000	90 %	k. A.	Zementindustrie
	182	75 %	k. A.	k. A.
	2.000	90 %	k. A.	Zementindustrie
	1.000	50–70 %	k. A.	MVA
	5.200	77 %	2.000	k. A.
	1.120	90 %	600	Zementindustrie
	9.620	90 %	3x1.500	Klärschlammvergasung/Zementindustrie
	10.000	95 %	2x2.700	Zementindustrie
	130	75 %	k. A.	k. A.
	216	70 %	k. A.	k. A.
	264	70 %	723	k. A.
	1.500	90 %	585	k. A.
	1.600	90 %	600	k. A.
	21.500	40 %	3x7.000	Monoverbrennung
	476	70 %	k. A.	thermisch
	2.000	90 %	k. A.	Zementindustrie
	600	90 %	875	Zementindustrie

Nr.	Standort / Betreiber	Bundesland	Verfahren	Hersteller
104	Neufahrn (bei Freising)	BY	Solartrockner	Thermo System
105	Neufahrn (bei Landshut)	BY	Solartrockner	IST Energietechnik
106	Neu-Ulm "Steinhäule"	BY	Dünnschichttrockner	BUSS-SMS-Canzler
107	Niederkrüchten	NW	Dünnschichttrockner	BUSS-SMS-Canzler
108	Noell, Freiberg	SA	Scheibentrockner	Haarslev
109	Nordstemmen	NI	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
110	Oberndorf am Neckar	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
111	Oberndorf am Neckar	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Seiler Biogasanlagen GmbH
112	Obersontheim	BW	Solartrockner	Thermo System
113	Oldenburg	NI	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
114	Oyten/Ottersberg	NI	Trommeltrockner	Andritz
115	Passau	BY	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
116	Penzing	BY	Solartrockner	HUBER
117	Pfullendorf	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
118	Pfullendorf	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Seiler Biogasanlagen GmbH
119	Pocking	BY	Solartrockner	Thermo System
120	Radegast	MV	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
121	Raubling	BY	Solartrockner	Thermo System
122	Renningen	BW	Solartrockner	Thermo System
123	Renquishausen	BW	Solartrockner	Thermo System
124	Riedlingen	BW	Solartrockner	IST Energietechnik
125	Riepe	NI	Solartrockner	Thermo System
126	Rödental	BY	Solartrockner	Thermo System
127	Röthenbach	BY	Solartrockner	IST Energietechnik
128	Rudersberg	BW	Solartrockner mit Abwärme	HUBER
129	Salzkotten	NW	Bandtrockner	Stela-Laxhuber
130	Scheßlitz	BY	Solartrockner	Thermo System
131	Schlitz Hutzdorf	HE	Solartrockner	Thermo System
132	Schlüßelfeld	BY	Solartrockner	Thermo System
133	Schönaich	BW	Solartrockner	Thermo System
134	Schönberg	BY	Solartrockner	Solartiger /Rothmaier
135	Schönerlinde	BE	Trommeltrockner	Bird Humboldt
136	Schongau	BY	Solartrockner	Thermo System
137	Schwandorf	BY	Bandtrockner	Sülzle Klein
138	Siegen	NW	Bandtrockner	Sülzle Klein
139	Sigmaringen	BW	Solartrockner	IST Energietechnik
140	Sinzig, Untere Ahr Sinzig,	RP	Scheibentrockner	Bird Humboldt

	Durchsatz tTS/a	Trocknungsgrad	Leistung kg H ₂ O/h	Bemerkung
	500	70 %	k. A.	k. A.
	280	70 %	k. A.	Rekultivierung
	10.000	40 %	2 x 2.200 + 1 x 3.900	eigene Wirbelschichtverbrennung
	382	68 %	330	k. A.
	400	> 95 %	400	k. A.
	376	70 %	k. A.	k. A.
	3.200	90 %	k. A.	Zementindustrie
	900	> 90 %	290	Zementindustrie
	200	80 %	k. A.	Thermische Verwertung
	10.000	70 %	k. A.	6000 m ²
	750	92 %	1.300	Mitverbrennung
	2.400	50–75 %	k. A.	k. A.
	250	70–90 %	666	Verbrennung
	9.000	90 %	k. A.	Zementindustrie
	1.800	> 90 %	2x290	Zementindustrie
	360	70 %	k. A.	k. A.
	334	80 %	k. A.	Thermische Verwertung
	250	60 %	k. A.	k. A.
	288	70 %	k. A.	k. A.
	21	90 %	k. A.	k. A.
	1.050	70 %	k. A.	Mitverbrennung
	600	80 %	k. A.	Land. Verwertung
	400	75 %	k. A.	k. A.
	400	40–70 %	k. A.	k. A.
	220	90 %	756	k. A.
	500	80 %	k. A.	k. A.
	110	75 %	k. A.	k. A.
	380	70 %	k. A.	k. A.
	300	75 %	k. A.	k. A.
	1.000	70 %	k. A.	k. A.
	150	> 85 %	k. A.	thermisch
	7.500	95 %	3x2.500	Monoverbrennung Ruhleben
	496	40 %	k. A.	k. A.
	10.500	90 %	4.600	Verbrennung
	3.000	90 %	1260	Verbrennung
	450	40–70 %	k. A.	Mitverbrennung
	350	95 %	1.000	k. A.

Nr.	Standort / Betreiber	Bundesland	Verfahren	Hersteller
141	St. Peter-Ording	SH	Solartrockner	Thermo System
142	Steinbrück	NI	Solartrockner	Thermo System
143	Steinen	BW	Scheibentrockner	Haarslev
144	Stockach	BW	Solartrockner	Thermo System
145	Stockstadt	By	Scheibentrockner	Kraftanlagen Heidelberg
146	Straubing	BY	Bandrockner mit Abwärme	HUBER
147	Straubing	BY	Bandrockner mit Abwärme	HUBER
148	Stuttgart-Mühlhausen	BW	Scheibentrockner	Haarslev/Atlas Stord
149	Sulz/Vöringen	BW	Solartrockner mit Abwärme	Roediger
150	Ühlingen-Birkendorf	BW	Solartrockner mit Abwärme	Kraus Umwelttechnik
151	Unterpleichfeld	BY	Solartrockner mit Abwärme	Roediger
152	Unterschneidheim	BW	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
153	Villingen-Schwenningen	BW	Bandrockner	Haarslev/Sevar
154	Waibstadt	BW	Solartrockner	Thermo System
155	Waldenburg	BW	Solartrockner	Thermo System
156	Waldshut-Tiengen	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Kraus Umwelttechnik
157	Wallmerod	RP	Bandrockner	Sülzle Klein
158	Wangen	BW	Bandrockner	Sülzle Klein
159	Wankheim	BW	Hallentrocknung mit Abwärmenutzung	Seiler Biogasanlagen GmbH
160	Warburg	NRW	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
161	Weddel-Lehre	NI	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
162	Wegscheid	BY	Solartrockner	Thermo System
163	Weil am Rhein	BW	Solartrockner mit Abwärme	IST Energietechnik
164	Weinheim	BW	Bandrockner	Sevar
165	Weißenhorn	BY	Bandrockner	Sülzle Klein
166	Westerburg	RP	Solartrockner mit Abwärme	Thermo System
167	Wilhelmsdorf	BW	Solartrockner	Thermo System
168	Winterhausen	BW	Solartrockner	Thermo System
169	Wolfratshausen	BY	Scheibentrockner	Haarslev
170	Wolfsburg	NI	Bandrockner	Sülzle Klein
171	Wuppertal	NW	Dünnschichttrockner	BUSS-SMS-Canzler
172	Wyk au Föhr	SH	Solartrockner	Thermo System
173	Zeckern / Gemeinde Hemhofen	BY	Solartrockner	Rothmaier
174	Zorbau bei Weißenfels	SN	Bandrockner	Sevar
175	Zwiefalten	BW	Solartrockner	I+M

	Durchsatz tTS/a	Trocknungsgrad	Leistung kg H ₂ O/h	Bemerkung
	160	75 %	k. A.	Land. Verwertung
	240	75 %	k. A.	k. A.
	800	90 %	500	Mitverbrennung Kohlekraftwerk
	750	70 %	k. A.	k. A.
	k. A.	> 95 %	k. A.	k. A.
	2.800	90 %	900	Zementindustrie
	1.740	90 %	560	Zementindustrie
	25.000	45 %	2x4.770	eigene Wirbelschicht-Verbrennung
	470	90 %	k. A.	Zementindustrie
	2.000	90 %	k. A.	k. A.
	700	90 %	k. A.	Zementindustrie
	250	80 %	k. A.	k. A.
	k. A.	85–90 %	650	k. A.
	275	70 %	k. A.	k. A.
	150	75 %	k. A.	Mitverbrennung Kohlekraftwerk
	3.000	90 %	k. A.	Zementindustrie
	140	85 %	100	momentan stillgelegt
	1.800	90 %	800	Zementindustrie
	900	> 90 %	290	Zementindustrie
	1.140	65–70 %	k. A.	k. A.
	350	55 %	k. A.	k. A.
	50	75 %	k. A.	k. A.
	1.440	70 %	k. A.	Mitverbrennung
	1.800	85 %	1.600	k. A.
	200	90 %	220	momentan stillgelegt
	813	60 %	k. A.	k. A.
	264	75 %	k. A.	k. A.
	1.100	60 %	k. A.	k. A.
	1.050	90 %	1.500	k. A.
	4.000	90 %	1.800	Zementindustrie
	15.000	45 %	4x2.540	k. A.
	230	75 %	k. A.	k. A.
	54	75 %	k. A.	k. A.
	12.500	90 %	4.650	Müllverbrennung
	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.

Quelle: eigene Erhebung



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.twitter.com/umweltbundesamt
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/